

行政院國家科學委員會

八十八年度石油暨石化產業科技學術合作研究計畫

化學品意外排放之擴散研究  
——物理與數值模擬

中 華 民 國 八 十 九 年 一 月

# 化學品意外排放之擴散研究

## --物理與數值模擬

### 期末報告

委託單位：中國石油股份有限公司

計畫類別：

計畫編號：88-CPC-E-032-016

執行期間：87 年 8 月 1 日至 88 年 12 月 31 日

計畫主持人：江旭程

共同主持人：吳國昌、鄭啟明、盧博堅

執行單位：淡江大學 水資源及環境工程學系

## 摘 要

關鍵字：重質氣體、風洞實驗、模式驗證

本研究利用淡江大學之大型邊界層風洞進行重質氣體擴散之物理模擬試驗。首先，發展一套代表低度開發城市之邊界層流；然後進行平坦地形的擴散，以檢定物理模擬重煙流之能力；最後，在山脊後方及於釋放源周遭放置方塊物體，以探討地形變化及建築尾流影響對重質氣體擴散的影響。

由物理模型實驗我們發現：

- (i) 進行地面釋放之被動源流擴散實驗時，體積通量比( $U_H/W$ )應注意保持在 20 以上，保證動量效應可忽略性。
- (ii) 在有地形尾跡影響之下的擴散行為模擬，雷諾數應保持在最低 8,000 至 10,000 以上。
- (iii) 在同一流場中進行重煙流之擴散實驗模型縮尺比例之扭曲至 1.3 擴散濃度之分佈尚無明顯的影響。

此一研究我們選擇DEGADIS和SLAB兩種模式，輸入與風洞實驗相同的條件，進行模擬，求出擴散後的濃度分佈，並與風洞實驗結果比較，以評估模式的表現。結果發現，在平坦地形模式計算值與風洞實驗值比較相當吻合，然而如有障礙物存在時，DEGADIS和SLAB兩種模式所求出的地面煙流中心濃度明顯低估。在複雜地形，類似DEGADIS和SLAB之類簡單的模式並無法模擬複雜地形的亂流特性，也因此無法得到正確的結果。

## ABSTRACT

key words : Dense gas, Wind tunnel Experiments, Model validation

A series of wind tunnel experiments were carried out in Tamakng University Wind Tunnel Laboratory to study the dispersion of dense gas caused by accidental release. A boundary layer was developed in the wind tunnel to simulate an urban situation. The dispersions in the flat terrain were investigated at the first stage, in order to evaluate our experimental ability. Then, a triangular ridge and a square block were added in front of the source. The effects of terrain variation and wake generated by building on the dispersion of dense gas were studied.

Results from physical modeling studies includes:

- (i) in ground-release passive-plume studies,  $U_H/W$  must be kept larger than 20 to ensure the negligibility of momentum effect;
- (ii) under the influence of topography and/or wale effects, minimum  $Re$  requirement is 8,000~10,000;
- (iii) a length scale distortion factor of 1.3 is permissible.

Two mathematical models, DEGADIS and SLAB, were chosen to carry out a series of numerical experiments. The parameters used by wind tunnel tests were input to the mathematical models to compute the concentration distributions. Then, the results of mathematical simulations were compared with the data of the physical experiments. For the flat terrain situations, the performances of SLAB and DEGADIS are pretty well when compared with the experimental data. However, the ground-level centerline concentrations were significantly

---



underestimated for the cases with obstacles or ridge. The simple models, such as SLAB and DEGADIS, cannot properly model the turbulence characteristics in a complex terrain, and hence, their results are incorrect.

# 目 錄

摘 要-----	I
ABSTRACT-----	II
目 錄-----	目錄 I
表目錄-----	目錄 III
圖目錄-----	目錄 IV
章 節	
第一章 前言-----	1-1
第二章 大氣擴散物理模擬之理論依據-----	2-1
2.1 大氣邊界層運動之模擬-----	2-1
2.1.1 對模擬參數之考慮-----	2-3
2.1.2 邊界層逼近流之相似性-----	2-6
2.2 煙流運動之物理模擬-----	2-8
2.2.1 煙流運動之近似模擬-----	2-10
第三章 實驗設計、實驗設備及儀器配置-----	3-1
3.1 風洞設備-----	3-1
3.2 流場之模擬與量測-----	3-2
3.2.1 逼近流之模擬方法-----	3-2
3.2.2 風速之量測-----	3-2
3.3 煙流之模擬與量測-----	3-4
3.3.1 煙源-----	3-4
3.3.2 釋放系統及採樣點之佈設-----	3-4
3.3.3 示蹤氣體之採樣與分析-----	3-5
3.4 煙流可視化方法-----	3-6
3.5 地形、地物之模擬-----	3-7

第四章 數學模式-----	4-1
4.1 DEGADIS 模式-----	4-1
4.2 SLAB 模式-----	4-2
第五章 結果與討論-----	5-1
5.1 模擬邊界層逼近流評估及擴散特性之檢定-----	5-1
5.2 被動煙流擴散之測試結果-----	5-3
5.2.1 煙源之動量效應 (Momentum Effect) -----	5-3
5.2.2 雷諾數之不變性 (獨立性) -----	5-4
5.3 煙流的擴散特性-----	5-5
5.3.1 地形地物之影響-----	5-6
5.3.2 不同密度比之影響-----	5-7
5.3.3 流場長度尺度扭曲之煙流相似性-----	5-7
5.4 平坦地形風洞實驗與模式模擬結果比較-----	5-8
5.5 有障礙物存在時，風洞實驗與模式模擬之比較-----	5-10
第六章 結果與建議-----	6-1
參考文獻-----	Ref-1
附錄 A-----	A-1

## 表目錄

表 3.1.1 主要開放式風洞一覽表-----	3-8
-------------------------	-----

## 圖目錄

圖 2.2.1 紊流頻譜之雷諾數變化特性(摘自 Neff,1989)	2-13
圖 3.1.1 淡江大學第一號邊界層風洞平立面圖	3-9
圖 3.2.1 邊界層流場配置方式(圓盤前緣為流場擴散特性檢驗之煙囪)	3-10
圖 3.2.2 風速量測系統	3-10
圖 3.3.1 (a)示蹤氣體採樣點配置圖	3-11
圖 3.3.1 (b)示蹤氣體採樣點示意圖	3-1
圖 3.3.2 示蹤氣體採樣及分析系統	3-12
圖 4.1.1 DEGADIS 模式中二次污染源和擴散模擬示意圖	4-6
圖 4.1.2 DEGADIS 模式中二次污染源擴張示意圖	4-7
圖 4.2.1 SLAB 模式中連續煙流擴散模擬	4-8
圖 4.2.2 SLAB 模式中陣噴(puff)擴散模擬	4-8
圖 5.1.1 平均風速剖面圖	5-11
圖 5.1.2 平均風速剖面圖(指數律方式)	5-12
圖 5.1.3 平均風速剖面圖(90% of $\delta$ )	5-12
圖 5.1.4 平均風速剖面圖(對數律方式)	5-13
圖 5.1.5 水平方向平均風速剖面圖	5-14
圖 5.1.6 縱向紊流強度剖面圖	5-15
圖 5.1.7 垂向紊流強度剖面圖	5-15
圖 5.1.8 縱向擾動風速頻譜(高度 2.5cm, $U > 0.58\text{m/sec}$ )	5-16
圖 5.1.9 縱向擾動風速頻譜(高度 2.5cm, $U < 0.58\text{m/sec}$ )	5-16
圖 5.1.10 橫向擴散濃度分佈剖面圖	5-17
圖 5.1.11 估計風洞擴散係數( $\sigma_y$ )與標準 Psquill Gifford 值之比較	5-17
圖 5.2.1 被動煙流中線上之無因次化濃度衰減迴歸結果	5-18
圖 5.3.1 縮尺 (1/285) 密度比 (1.0) 固定, 不同地形地物之濃度係數分佈	5-19
圖 5.3.2 縮尺 (1/260) 密度比 (1.0) 固定, 不同地形地物之濃度係數分佈	5-20

圖 5.3.3 縮尺 (1/235) 密度比 (1.0) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-21
圖 5.3.4 縮尺 (1/205) 密度比 (1.0) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-22
圖 5.3.5 縮尺 (1/285) 密度比 (1.2) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-23
圖 5.3.6 縮尺 (1/260) 密度比 (1.2) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-24
圖 5.3.7 縮尺 (1/235) 密度比 (1.2) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-25
圖 5.3.8 縮尺 (1/205) 密度比 (1.2) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-26
圖 5.3.9 縮尺 (1/285) 密度比 (1.35) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-27
圖 5.3.10 縮尺 (1/260) 密度比 (1.35) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-28
圖 5.3.11 縮尺 (1/235) 密度比 (1.35) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-29
圖 5.3.12 縮尺 (1/205) 密度比 (1.35) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-30
圖 5.3.13 縮尺 (1/285) 密度比 (1.53) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-31
圖 5.3.14 縮尺 (1/260) 密度比 (1.53) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-32
圖 5.3.15 縮尺 (1/235) 密度比 (1.53) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-33
圖 5.3.16 縮尺 (1/205) 密度比 (1.53) 固定，不同地形地物之濃度係數分佈	5-34
圖 5.3.17 平坦地形之煙流可視化 (上視圖)	5-35
圖 5.3.18 平坦地形之煙流可視化 (側視圖)	5-35
圖 5.3.19 二維方塊之煙流可視化 (上視圖)	5-36
圖 5.3.20 二維方塊之煙流可視化 (側視圖)	5-36
圖 5.3.21 三維山脊方塊之煙流可視化 (上視圖)	5-37

圖 5.3.22 三維山脊之煙流可視化 (側視圖)	5-37
圖 5.3.23 縮尺 (1/285) 地形地物 (flat) 固定, 不同密度比之濃度係數分佈	5-38
圖 5.3.24 縮尺 (1/285) 地形地物 (block) 固定, 不同密度比之濃度係數分佈	5-39
圖 5.3.25 縮尺 (1/285) 地形地物 (mountain) 固定, 不同密度比之濃度係數分佈	5-40
圖 5.3.26 縮尺 (1/260) 地形地物 (flat) 固定, 不同密度比之濃度係數分佈	5-41
圖 5.3.27 縮尺 (1/260) 地形地物 (block) 固定, 不同密度比之濃度係數分佈	5-42
圖 5.3.28 縮尺 (1/260) 地形地物 (mountain) 固定, 不同密度比之濃度係數分佈	5-43
圖 5.3.29 縮尺 (1/235) 地形地物 (flat) 固定, 不同密度比之濃度係數分佈	5-44
圖 5.3.30 縮尺 (1/235) 地形地物 (block) 固定, 不同密度比之濃度係數分佈	5-45
圖 5.3.31 縮尺 (1/235) 地形地物 (mountain) 固定, 不同密度比之濃度係數分佈	5-46
圖 5.3.32 縮尺 (1/205) 地形地物 (flat) 固定, 不同密度比之濃度係數分佈	5-47
圖 5.3.33 縮尺 (1/205) 地形地物 (block) 固定, 不同密度比之濃度係數分佈	5-48
圖 5.3.34 縮尺 (1/205) 地形地物 (mountain) 固定, 不同密度比之濃度係數分佈	5-49
圖 5.3.35 密度比 (1.0) 地形地物 (flat) 固定, 不同縮尺之濃度係數分佈	5-50
圖 5.3.36 密度比 (1.2) 地形地物 (flat) 固定, 不同縮尺之濃度係數分佈	5-51
圖 5.3.37 密度比 (1.35) 地形地物 (flat) 固定, 不同縮尺之濃度係數分佈	5-52
圖 5.3.38 密度比 (1.53) 地形地物 (flat) 固定, 不同縮尺之濃度係數分佈	5-53

圖 5.3.39 密度比 (1.0) 地形地物 (block) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈	5-54
圖 5.3.40 密度比 (1.2) 地形地物 (block) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈	5-55
圖 5.3.41 密度比 (1.35) 地形地物 (block) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈	5-56
圖 5.3.42 密度比 (1.53) 地形地物 (block) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈	5-57
圖 5.3.43 密度比 (1.0) 地形地物 (mountain) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈	5-58
圖 5.3.44 密度比 (1.2) 地形地物 (mountain) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈	5-59
圖 5.3.45 密度比 (1.35) 地形地物 (mountain) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈	5-60
圖 5.3.46 密度比 (1.53) 地形地物 (mountain) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈	5-61
圖 5.4.1 平坦地形，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.3m，風洞實驗結果和模式模擬值之比較	5-62
圖 5.4.2 平坦地形，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.1m，風洞實驗結果和模式模擬值之比較	5-63
圖 5.4.3 平坦地形，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.01m，風洞實驗結果和模式模擬值之比較	5-64
圖 5.4.4 粗糙度為 0.3m 時，平坦地形地區，不同密度比的實驗和模式計算結果之比較	5-65
圖 5.4.5 粗糙度為 0.1m 時，平坦地形地區，不同密度比的實驗和模式計算結果之比較	5-66
圖 5.4.6 粗糙度為 0.01m 時，平坦地形地區，不同密度比的實驗和模式計算結果之比較	5-67
圖 5.5.1 實驗時有方塊，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.3m，風洞實驗結果和模式模擬值之比較	5-68
圖 5.5.2 實驗時有方塊，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.1m，風洞實驗結果和模式模擬值之比較	5-69
圖 5.5.3 實驗時有方塊，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.01m，風洞實驗結果和模式模擬值之比較	5-70



圖 5.5.4 實驗時有山脊，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.3m，風洞 實驗結果和模式模擬值之比較	5-71
圖 5.5.5 實驗時有山脊，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.1m，風洞 實驗結果和模式模擬值之比較	5-72
圖 5.5.6 實驗時有山脊，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.01m，風 洞實驗結果和模式模擬值之比較	5-73
圖 5.5.7 為不同障礙物對地面中心濃度之影響	5-74
圖 A-1 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/285, $\rho_s/\rho_a=1.0$ )	A-1
圖 A-2 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/285, $\rho_s/\rho_a=1.0$ )	A-2
圖 A-3 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/285, $\rho_s/\rho_a=1.0$ )	A-3
圖 A-4 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/285, $\rho_s/\rho_a=1.2$ )	A-4
圖 A-5 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/285, $\rho_s/\rho_a=1.2$ )	A-5
圖 A-6 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/285, $\rho_s/\rho_a=1.2$ )	A-6
圖 A-7 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/285, $\rho_s/\rho_a=1.35$ )	A-7
圖 A-8 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/285, $\rho_s/\rho_a=1.35$ )	A-8
圖 A-9 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/285, $\rho_s/\rho_a=1.35$ )	A-9
圖 A-10 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/285, $\rho_s/\rho_a=1.53$ )	A-10
圖 A-11 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/285, $\rho_s/\rho_a=1.53$ )	A-11
圖 A-12 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/285, $\rho_s/\rho_a=1.53$ )	A-12
圖 A-13 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/260, $\rho_s/\rho_a=1.0$ )	A-13
圖 A-14 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面	A-14

(scale=1/260, $\rho_s/\rho_a=1.0$ )	
圖 A-15 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/260, $\rho_s/\rho_a=1.0$ )	A-15
圖 A-16 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/260, $\rho_s/\rho_a=1.2$ )	A-16
圖 A-17 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/260, $\rho_s/\rho_a=1.2$ )	A-17
圖 A-18 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/260, $\rho_s/\rho_a=1.2$ )	A-18
圖 A-19 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/260, $\rho_s/\rho_a=1.35$ )	A-19
圖 A-20 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/260, $\rho_s/\rho_a=1.35$ )	A-20
圖 A-21 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/260, $\rho_s/\rho_a=1.35$ )	A-21
圖 A-22 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/260, $\rho_s/\rho_a=1.53$ )	A-22
圖 A-23 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/260, $\rho_s/\rho_a=1.53$ )	A-23
圖 A-24 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/260, $\rho_s/\rho_a=1.53$ )	A-24
圖 A-25 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235, $\rho_s/\rho_a=1.0$ )	A-25
圖 A-26 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235, $\rho_s/\rho_a=1.0$ )	A-26
圖 A-27 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235, $\rho_s/\rho_a=1.0$ )	A-27
圖 A-28 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235, $\rho_s/\rho_a=1.2$ )	A-28
圖 A-29 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235, $\rho_s/\rho_a=1.2$ )	A-29
圖 A-30 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235, $\rho_s/\rho_a=1.2$ )	A-30
圖 A-31 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235, $\rho_s/\rho_a=1.35$ )	A-31

圖 A-32 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235, $\rho_s/\rho_a=1.35$ )	A-32
圖 A-33 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235, $\rho_s/\rho_a=1.35$ )	A-33
圖 A-34 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235, $\rho_s/\rho_a=1.53$ )	A-34
圖 A-35 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235, $\rho_s/\rho_a=1.53$ )	A-35
圖 A-36 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235, $\rho_s/\rho_a=1.53$ )	A-36
圖 A-37 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205, $\rho_s/\rho_a=1.0$ )	A-37
圖 A-38 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205, $\rho_s/\rho_a=1.0$ )	A-38
圖 A-39 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205, $\rho_s/\rho_a=1.0$ )	A-39
圖 A-40 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205, $\rho_s/\rho_a=1.2$ )	A-40
圖 A-41 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205, $\rho_s/\rho_a=1.2$ )	A-41
圖 A-42 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205, $\rho_s/\rho_a=1.2$ )	A-42
圖 A-43 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205, $\rho_s/\rho_a=1.35$ )	A-43
圖 A-44 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205, $\rho_s/\rho_a=1.35$ )	A-44
圖 A-45 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205, $\rho_s/\rho_a=1.35$ )	A-45
圖 A-46 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205, $\rho_s/\rho_a=1.53$ )	A-46
圖 A-47 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205, $\rho_s/\rho_a=1.53$ )	A-47
圖 A-48 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205, $\rho_s/\rho_a=1.53$ )	A-48

# 第一章 前言

## 1.1 計畫緣起

天然氣燃燒之後對環境的污染較小，因此逐漸成為家庭與工業界廣泛使用的能源。為了方便長距離輸送，常把天然氣冷卻到 $-162^{\circ}\text{C}$ ，以液態儲存和輸送，就是所謂的液化天然氣(LNG)。在此一溫度下如果儲槽或管線破裂，LNG 會溢流出來，天然氣快速的揮發，造成可燃性氣體的擴散，一不小心就會產生爆炸。雖然這類危機發生的機會很小，然而一旦發生往往會造成極大的損失，為避免災害的發生，所以當這些氣體外洩時我們必須利用模式進行評估，以決定主要影響範圍，疏散人員，採取適當的防災措施。

在低溫下 LNG 的密度比空氣還重，氣體外洩後受到重力的作用，往低窪的地區流動，不但覆蓋較大的面積，且停留較長的時間，因此其危害較浮升的污染物為大 (Chan, 1998)。除了 LNG，還有很多意外排放的化學物質其密度較空氣為大，我們通常稱之為重氣體(heavy gas)，造成重氣體雲(cloud)的主要原因為 (Havens et al., 1994)：低溫排放(如 LNG)，高分子量(如氯氣、光氣等)，或有液態氣膠(如高壓排放的氨或 HF 等)。

重氣體的擴散和一般煙囪煙流的擴散大不相同，重氣體的擴散受到附近地形、地物的影響極大，尤其近場(near field)高濃度地區污染物的蒸發與擴散會影響到附近的氣流(Hartwig, 1983; Chan, 1998)，所以要預測重氣體的擴散較為困難。在國外有許多氣體外洩擴散的相關研究，但技術仍有改善的空間，至於台灣地區據吾人所知過去並無相關的研究，因此引發我們進行此一研究的動機。

此一研究將針對意外洩漏的重氣體(如 LNG)在大氣中擴散現象進行風洞實驗和數值模擬，並將結果互相驗證。此為第一年的計畫，因此重點放於風洞實驗技術及數值模式的驗證，所以將考慮較為簡化的條件，當技術建立完成之後，希望未來可以選則一個中油工廠進行測試。

## 1.2 前人研究

意外排放的重氣體擴散研究可分為三大類：外場實驗(field study)，風洞模擬(wind tunnel experiment)和數學模式(mathematical model)。下面就過去相關的研究作一回顧。

### (A)外場實驗

在 1980 年代國外曾進行許多外場實驗(Ermak, et al., 1989)以探討重氣體擴散的現象，例如 Lawrence Livermore National Laboratory(LLNL)，Shell Research Ltd.，和 British Health and Safety Executive (HSE) 等皆曾進行此種研究。

外場實驗可提供最接近真實的結果，然而此類實驗須大量人力、物力的支援，而且受外界氣象變化的影響極大，實驗的條件無法控制為其最大缺點。目前此類外場實驗已較少進行，不過過去實驗所收集的大量資料，發揮了很大的功用，除用於發展模式外，也可用於評估風洞實驗結果是否正確。

外場實驗中以美國 LLNL 所進行的一系列實驗最為著名，LLNL 的實驗分為三個系列(Ermak, et al., 1989)：1978 年所進行的 Avocet 實驗，主要進行儀器評估；1980 年所進行的 Burro 系列，則探討重氣體擴散；1981 年的 Coyote 系列，則研究快速相變化(rapid-phase change)和燃燒現象及重氣體擴散。Burro 和 Coyote 實驗都是在加州 China Lake 的 Naval Weapons Center (NWC)試驗場地進行。

Ermak 等(1989)將外場重氣體擴散實驗相關資料整理成冊，列出實驗的地形、氣象及排放條件，利用這些實驗數據研究人員可驗證風洞實驗及數值模擬的結果。

### (B)風洞模擬

過去國外曾做過一些重煙流的物理模擬實驗，Sakagami & Kato (1968)在一架試驗段為 50x50x200cm 的風洞內量測一個 5x10cm 小池的 LNG 擴散，他們確定煙流確有在地面上保持高濃度的傾向。Boyle & Kneebone (1973) 在一架試驗段為 1.5x1.2x5m，牆壁用石棉做成的風洞內，將預先冷卻的甲烷和丙烷由水面釋出，其結論為在室溫下釋出之丙烷能將 LNG 外溢做相當好的模擬。Hoot & Meroney (1973) 及 Hall(1977) 在風洞內做地表點源的釋放實驗，發現所釋放的煙流即使比重高達

3.0，雖然煙流的截面有相當大的差異，但其濃度的極大值隨著距離的衰減只有稍微的移動。Hall 則在粗糙以及上下坡的坡面上做瞬時及連續的釋放，他發現當坡度達到 1:12 時，淺、寬的煙流其形狀會有很大的改變。Neff 等人(1976)在科羅拉多大學利用風洞，來評估 LNG 儲槽破裂時擴散的速率及下風的危害範圍，接著 Meroney 等人(1976)在相同情況下作了一系列的瞬間及上坡的釋放實驗，他們用同溫重混合氣體( $\text{CO}_2$ ，Feron-12 及空氣或 Ar)或輕混合氣體( $\text{H}_2$ & $\text{N}_2$ )來模擬甲烷煙流的行為，這些研究的一個很重要結論即在不太高的風速下，用同溫高分子量的混合氣體可以足夠地模擬 LNG 的氣體濃度，在 1982 年 Meroney & Neff(1982)配合 China Lake Naval Weapons Center 之一  $6\text{m}^3$  外溢的外場實驗，作了一系列的風洞模擬試驗，並將其結果作了一些對比，他們發現地形效應相當可觀。

Roberts and Hall (1994) 進行了一系列的實驗，探討粗糙元素比污染源厚度還大時的擴散情形，並將實驗結果與 HEGADAS 比較，結果發現當氣動粗糙度 (aerodynamic roughness length) 達到 0.5 m 時，模式計算值和風洞實驗結果仍然接近。

Havens, Walker and Spicer (1994) 在風洞中進行 LNG 擴散實驗，並與數值模式驗證，由於一般的數學模式往往考慮平坦地形，而此一研究中將實驗結果與 FEM3A 比較，因此，釋放的地形較為複雜。

Zhu, Arya, and Synder (1998) 進行風洞實驗以了解重氣體煙流對大氣邊層中亂流結構和平均流的影響，重氣體由地面上的一個圓形開口排放，利用  $\text{CO}_2$  來產生重氣體，結果發現在低風速下，重氣體煙流存在顯著浮力效應，會改變邊界層的平均風速，降低粗糙度和摩擦速度，側向和垂直向的擴散係數會減低。

由於重氣體的擴散受到附近地形的影響極大，因此，地形或障礙物對擴散的影響也逐漸成為風洞實驗探討的主題，例如 Ayrault et al. (1998) 探討了下風方向的障礙物對擴散的影響，除了量測流場外，也利用數位影像處理技術來探討煙流的特徵和變化。

用風洞來模擬 LNG 的擴散，實際的應用上主要的困難在於：(1)在低風速下維持一穩定的風速剖面，(2)對邊界層紊流之紊流特性在低速下之正確模擬，(3)近場紊流縮尺的一些雷諾數束縛(Reynolds number constraints)，有關這些相關問題的討論詳見 Meroney (1979)。

---

### (C)數學模式

過去國外發展許多意外災害擴散模式(Zannetti, 1990; Hanna et al., 1991; 江,1994),美國能源部(DOE)曾組織一個化學擴散及影響評估工作小組(Chemical Dispersion and Consequence Assessment Working Group, CDCA)對化學災害擴散模式進行評估,該小組評估 100 多個模式後建議模式如下:

- 1.一般用途之建議模式: ALOHA, DEGADIS, HGSYSTEM, SLAB。
- 2.特殊用途之建議模式: ADAM, CALPUFF, FEM3C, INPUFF, SCREEN。
- 3.必須再評估的模式: CASRAM-SC, AQPAC, HOTMAC/RAPTAD, CTDMPULU SCIPUFF, GAUS 1, AFTOX, HARM II, ARAC II, RTVSM。

一般而言,緊急意外事件模式可以分為兩個部份:排放源模式(source model)和擴散模式(diffusion model)。排放源模式乃根據初始排放條件和物質特性,以計算排放速率、氣體雲(gas cloud)或溢池(spill pool)之大小、蒸發速率等資料,排放源模式之計算結果就是後續擴散模式的輸入資料。擴散模式則用於預測污染物受外界氣流與亂流作用後所產生的擴散,為了方便討論我們再將擴散分為近場(near field)和遠場(far field)兩種,前者為污染雲逐漸擴大,但濃度仍相當高,因此擴散及氣流會受到污染雲的影響,而且此一階段擴散現象受地形地物影響極大。等到污染物濃度稀釋到 ppm 的等級,其密度及性質接近大氣狀況,可視為被動擴散(passive diffusion),此一階段吾人稱之為遠場。

意外事件氣體擴散模式雖有數十個,但是擴散模式大致可將其分為下列三種:

#### (1)高斯擴散模式:

高斯煙流模式(Gaussian plume model)為最廣泛應用的大氣擴散模式,經適當修正後也可用於重氣體的擴散,DEGADIS(Spicer and Havens, 1989)為意外排放氣體近場擴散最常用的模式。美國 NOAA Hazardous Materials Response and Assessment Division 與美國 EPA Chemical Emergency Preparedness and Prevention Office 所合作發展完成 ALOHA 系統也採用 DEGADIS 的計算方法。因此我們將以 DEGADIS 作為高斯煙流模式的代表進行評估。

---

## (2) 板塊模式

板塊模式為箱型模式的修正，如果將許多長方形的箱盒互相連接，即可求出板塊模式，CDCA 所建議的化學災害擴散模式中 HGSYSTEM (Puttock, 1986)和 SLAB(Ermak, 1990)即為板塊模式，在此一研究中將以 SLAB 模式做為板塊模式之代表。

## (3) 三維尤拉擴散模式

三維尤拉擴散模式直接求解偏微分制御方程式，不但可以求出各種複雜的擴散情形，而且可以了解擴散的詳細過程；然而使用這些模式須要複雜的計算，因此要有高速電腦才能做實際的應用，所以在過去較少應用。過去用於意外排放氣體在近場之擴散模擬以 FEM3C(Chan, 1998)最為常用，目前有許多計算流體力學的套裝軟體也可進行類似計算。

據我們了解，過去台灣並無研究利用有限元素法模擬近場的氣流和擴散，可是台灣地區台灣地區地狹人稠，往往廠區附近即有居民，必須使用較準確的模式預測，才能減輕風險，而且目前電腦技術快速發展，計算速度大為提升，未來數值模式在公安及意外事件中使用的機會一定會大為增加。由於時間和經費的限制，本年度的計畫中我們無法進行三維尤拉模式的應用研究，此有待未來繼續努力。

意外事件氣體擴散模式雖然常與外場實驗加以比較驗證，然而大部份外場實驗都在較平坦且空曠的地方進行，因此嚴格地來講，大部份模式只經簡單地形的驗證。另一方面，石化工廠或儲存場都有許多儲槽及廠房，這些建築物對擴散應有很重要的影響，但擴散模式在此種複雜地型是否正確則較少驗證，這是使用擴散模式的隱憂(Hartwig, 1982)。

過去也有一些模式引入台灣使用，工研院曾針對 Desert Tortoise 及 Goldfish 外場實驗利用 CHEM-PLUS, EFFECTS, DENZ, CRUNCH 模式進行模擬並評估其結果(高、李,1994)。陳錫仁教授也用 EFFECTS 進行擴散模擬，這些模式多屬較為簡單的高斯或板塊模式。張乃彬等(1996)則曾經應用 HOTMAC/RAPTAD 於毒性物質的擴散，這模式使用三維風場模式和醉步法(random walk)擴散模式，一般而言比較適用於“遠場擴散”。

氣體意外排放必須對“近場擴散”做精密的預測，才能擬定正確的應變措施，因此在此一研究中將在高斯模式、板塊模式中各選一個代表性的模式進行深入的評估，並與風洞實驗結果相驗證。



### 1.3 計畫目標

本研究主要利用淡江大學之大型邊界層風洞，從事一系列物理模擬試驗，並配合數值模式及外場實驗數據，以建立一套可信度較高之重煙流擴散(heavy plume diffusion)評估方法。

物理模擬之工作重點為：

- (1)發展一套代表低度開發城市之邊界層流。
- (2)在開闊地形的情況下，檢定風洞實驗模擬重煙流之能力。將選擇一組外場實驗，考慮其地形、氣象條件和排放特性，於風洞中進行相似的實驗，比較外場實驗和風洞模擬的結果，以了解風洞實驗的正確性。
- (3)於釋放源周遭，放置簡單幾何形狀物體，檢驗在地形變化及建築尾流影響下，相似參數扭曲的影響。

數值模擬的工作重點為：

- (1)模式評估：針對兩個數學模式(DEGADIS, SLAB 模式)進行評估，在與風洞實驗相同條件下進行模擬，求出擴散後的濃度分佈，並與風洞實驗結果比較以了解各模式的表現(performance)。
- (2)模式改善：針對模式的缺點加以修改，使其預測更為準確。

此一研究之結果可用於：

- (1)環境影響評估：於規劃階段考慮各種可能的狀況加以評估，決定不同排放條件及大氣狀況下主要的影響範圍，對廠區的佈置作安全性的考量，並據以決定分隔帶的寬度；同時實驗的結果也可用於建立、驗證、及修正數值模式；
- (2)所建立的數值模式可用於緊急意外事件中即時(real time)擴散模擬，以擬定應變計畫。

## 第二章 大氣擴散物理模擬之理論依據

主導大氣及煙流運動之基本方程，乃流體動力學中之質量、動量及能量守恆方程。從對這些方程的尺度分析或相似理論中可以得到風洞物理模擬所需之完整之參數（Cermak,1975；Snyder,1981；Kline,1965）。這些相似法則，可概括分為（1）動力相似（dynamic similarity），（2）熱力相似（thermodynamic similarity），以及（3）幾何相似（geometrical similarity），在以下各節中將對這些相似法則加以討論。

### 2.1 大氣邊界層運動之模擬參數

使用以角速度 $\Omega$ 轉動之地球為參考座標，流體運動可以用下列方程式來表述（Lumley & Panofsky,1964）：

動量守恆方程式：

$$\frac{\partial U_i}{\partial t} + \frac{U_j \partial U_i}{\partial x_j} + 2\varepsilon_{ijk} U_k \Omega_j = -\frac{1}{\rho_0} \frac{\partial \delta P}{\partial x_i} + \frac{g}{T_0} \delta T \delta_{3i} + \frac{\nu \partial^2 U_i}{\partial x_k \partial x_k} \quad (2.1)$$

質量守恆方程：

$$\frac{\partial U_i}{\partial x_i} = 0 \quad (2.2)$$

能量守恆方程：

$$\frac{\partial \delta T}{\partial t} + \frac{\partial \delta T}{\partial x_i} U_i = \kappa \frac{\partial^2 \delta T}{\partial x_i \partial x_i} \quad (i=1,2,3) \quad (2.3)$$

上式中 $x_1$ ， $x_2$ ， $x_3$ 分別為順風向、橫風向及垂直方向之座標。 $U_i$ 為

瞬間流速， $\delta P$  及  $\delta T$  分別為偏離中性大氣之壓力及溫度差， $\rho_0$  及  $T_0$  分別為中性大氣之密度及溫度（高程  $z$  之函數）， $\nu$  為運動黏滯係數， $\kappa$  為熱擴散係數。

將(2.1)，(2.2)及(2.3)三方程，以下列各參考量進行無因次化： $L$ ，長度尺度； $U_R$ ，速度； $\rho_R$ ，密度； $\delta T_R$ ，溫度差；以及 $\Omega_R$ ，角速度，亦即：

$$x'_i = \frac{x_i}{L}; U'_i = \frac{U_i}{U_R}; t' = \frac{U_R}{L} t; \rho' = \frac{\rho_0}{\rho_R}; \delta P' = \frac{\delta P}{P_R U_R^2}; \delta T' = \frac{\delta T}{\delta T_R};$$

$$\Omega'_j = \frac{\Omega_j}{\Omega_R}, \text{ 吾人可得}$$

$$\frac{\partial U'_i}{\partial t'} + U'_j \frac{\partial U'_i}{\partial x'_j} + \frac{2}{R_0} \varepsilon_{ijk} U'_k \Omega'_j = -\frac{1}{\rho'} \frac{\partial \delta \rho'}{\partial x'_i} + \frac{1}{F_r^2} \delta T' \delta_{3i} + \frac{1}{R_e} \frac{\partial^2 U'_i}{\partial x'_j \partial x'_j} \quad (2.4)$$

$$\frac{\partial U'_i}{\partial x'_i} = 0 \quad (2.5)$$

$$\frac{\partial \delta T'}{\partial t'} + U'_i \frac{\partial^2 \delta T'}{\partial x'_i} = \frac{1}{P_e} \frac{\partial^2 \delta T'}{\partial x'_i \partial x'_i} \quad (2.6)$$

式中：

$$R_0 \equiv \frac{U_R}{L \Omega_R} \quad \text{為通常所稱之羅斯培數(Rossby number)}$$

$$F_r \equiv \frac{U_R}{(gL \delta T_R / T_0)^{1/2}} \quad \text{為密度福祿數(Densimetric Froude number)}$$

$$R_e \equiv \frac{U_R L}{\nu} \quad \text{為雷諾數(Reynolds number)}$$

$$P_e \equiv \frac{U_R L}{\kappa} \quad \text{為培克烈數(Peclet number)}$$

由上述方程組所主控的不同流場，彼此之間若要達到完全之相似，則每組流場之上述無因次化參數，必須完全相等。除此之外，其邊界條

件亦必須完全相似。這些邊界條件包括有：

- (1) 表面粗糙物之分佈(包括表面氣動粗糙性質)；
- (2) 地形起伏；
- (3) 表面溫度之分佈。

就相似模擬的角度而言，例如原型流場與模型流場，如(2.4)至(2.6)三式中的常數  $R_0$ ， $F_r$ ， $R_e$  及  $P_e$  以及無因次化的邊界條件完全相同，則其各自的無因次解  $U'_1$ ， $U'_2$ ， $U'_3$ ， $\delta'_p$  及  $\delta T'$  應完全相同，換言之，從微尺度至中尺度( $10^{-3} \sim 10^{-5}$  m)之氣流運動，可以被準確地模擬。但是，以當今之實驗設備與能力而言，上述所有相似率的要求，無法能同時都得到滿足。所以必須採用部分或近似模擬，由於這個侷限性，在考慮某特定應用問題之相關大氣運動之模擬時，只能側重在針對問題本身具有最大意義之尺度氣流，做盡可能正確的模擬。

### 2.1.1 對模擬參數之考慮

對上述各參數嚴格要求其相等，往往是不必要的苛求，造成模擬上的困難。視情況之不同，可以盡量斟酌放鬆一些參數的相似性要求，同時又不致於對模擬之流場造成太大之影響。

(1) 羅斯培數， $R_0$ ，代表科氏力(Coriolis force)對大氣運動的影響程度，在風洞實驗中對科氏力模擬有極大的困難，無法達到在原型與模型間羅斯培數相等的要求。但是在模擬邊界層氣流運動時，如果所考慮之尺度不大，例如微尺度(microscale)煙流現象，在中性或穩定之大氣以及相對不太崎嶇的地形情況下，地球自轉對流場所產生的影響可謂極小。一般言之，在水平距離小於十公里(Snyder, 1981 建議不超過五公里)，垂直距離不超過一公里的情況下，此項效應可以忽略。

地表釋放重煙流之擴散問題，所考慮到之高度一般比大氣邊界層之高度小兩個數量級。在這種情況下，羅斯培數之相等要求可以不必指定。

(2) 雷諾數， $Re$ ，為慣性力與黏滯力之比值。主宰邊界層內紊流之運動與動力結構(Hinze, 1975)。此一特性，可以從紊流之動能在頻譜上之分佈與雷諾數變化之關係上，明顯地看出。雷諾數相等之要求表示：

$$U_m = \left( \frac{L_p}{L_m} \right) U_p \quad (2.7)$$

式中以  $m$  及  $p$  分別代表模型與原型。如果模型有相當大之縮尺比例，根據上式，模型實驗之風速要求有可能必須超過音速。所以，在雷諾數相等此一要求上必須有所妥協。

圖 2.1.1 顯示，雷諾數之改變只改變紊流頻譜上高頻部分之能量分佈。由於在邊界層內，大尺度（低頻）之運動主宰著動量與質量之傳輸，所以存在著一個範圍的雷諾數，在此雷諾數之範圍內，流場之總體性質，如平均及紊流風速剖面，表面阻力，煙流之擴散特性等，不因雷諾數之變化而改變(Hinze,1975; Schlichting,1968)。這種在紊流中相對於雷諾數之不變性，使得大氣流動之縮尺物理模擬實驗成為可行。但是，同時也存在著一個雷諾數之底限，低於此一底限，邊界層流之流場特性就失去了它的雷諾數獨立性，此一雷諾數之底限一般公認為：

$$R_e = U_* Z_0 / \nu > 2.5 \quad (2.8)$$

式中  $U_*$  為摩擦速度， $Z_0$  為粗糙長度。但是，此一要求並不適用於流經複雜地形或具有建築物尾跡影響之流場。

對某一特定之擴散問題，其擴散特性究竟是由紊流頻譜中何段尺度之渦流所主控，此一問題，至今尚無明確的答案。所以，對某一特定之擴散問題，界定其雷諾數不變性之底限的一個方法是在逐步調降風速（亦即逐步調降雷諾數）的情況下，進行一系列之被動煙流試驗。經過煙源強度修正過之濃度場，如果具有雷諾數之不變性，則應該顯示出相似的結構。具有這個相似性的最低可接受之雷諾數應該為此一特定擴散問題之雷諾數底限。如果雷諾數低於此一底限值，那麼在紊流頻譜上主導此特定擴散問題之紊流特徵尺度，應該是已經沒有得到適當的模擬。

Halitsky(1969)，將一方塊模型置放在一個近乎均勻之流場內，進行了一系列上述方法之擴散試驗。Halitsky 發現，在方塊模型表面及下風位置之濃度場分佈，雷諾數（基於模型之高度及在此高度之參考風速）必須超過 11,000 時，方能顯示出它的雷諾數獨立性。

重煙流之存在有可能大幅改變上述擴散特性之雷諾數不變性範圍。Hall(1997)指出，在由地表釋放之重煙流內，其流速明顯地較逼近流為低。在此種情況下，在重煙流內之流場，有高度之可能，重新地被線流化。雷諾數之大小對煙流之相似性之影響，可以從與實場實驗結果之對比或將模擬之重煙流釋入不同特徵尺度之風洞邊界層內來評估。

(3)培克烈數， $P_e$ ，及雷諾-休密特數， $R_e - S_c$ ，可分別寫成：

$$P_e = \frac{U_R L}{\kappa} = \frac{U_R L}{\nu} \cdot \frac{\nu}{\kappa} = R_e \cdot P_r \quad (2.9)$$

式中  $P_r$  為普朗特數(Prandtl number)，以及

$$R_e \cdot S_c = \frac{U_R L}{\nu} \cdot \frac{\nu}{\alpha} = \frac{U_R L}{\alpha} \quad (2.10)$$

此二無因次參數具有同樣之形式，即為雷諾數與一分子傳輸係數比之乘積。普朗特數為動量擴散(momentum diffusivity)與熱擴散(thermal diffusivity)之比，休密特數則為動量擴散與質量擴散(mass diffusivity)之比。可見普朗特數與休密特數皆為流體本身之性質而非流場之性質。如果以空氣為介質進行擴散之物理模擬實驗，在原型與模型之間其普朗特數及休密特數（對幾乎任何釋入空氣中之污染氣體）幾乎相等。所以在衡量培克烈數與雷諾-休密特數是否相當時，重點不在普朗特數與休密特數，而在雷諾數；如上所述，如果一個流場之雷諾數足夠高，則其間污染物質之傳輸主要是由紊流中之大型結構所帶動，分子傳輸部份之貢獻極為微小。所以美國環保署之模擬準則(Snyder,1981)中指出，在原型與模型間培克烈數或雷諾-休密特數相等之要求並不重要，只要雷諾數足夠高，流場顯示出其對雷諾數之獨立性即可。

(4)福祿數， $F_r$ ，為慣性力與浮升力比值之平方根，與李查遜數(Richardson number)之平方根成倒數關係。在模擬大氣擴散的實驗中福祿數應該是一個最重要的參數。通常有二個福祿數必須考慮，一是因為大氣層結構所形成之大氣氣流之福祿數以及煙流自身之福祿數。在實驗中為達到與原型相似的較小福祿數值，必須將風洞之風速調低，但為了達到模型與原型間雷諾數相似的要求又必須儘可能將風速提高。此一互相矛盾兩極化的要求，其解決方法是在滿足福祿數相似之要求下，儘可能提高風洞的運轉風速以保證流場特性的雷諾數獨立性。

### 2.1.2 邊界層逼近流之相似性

地表附近空氣的移動受到地表之起伏、建築物、林木作物分佈等的摩擦作用影響，使得平均風速隨高度而變，形成一垂直分佈剖面，越接近地表，風速越慢；換言之，此「風速剖面」直接受到地表粗糙狀況之影響。而影響所及的範圍就稱之為「大氣邊界層」。在邊界層頂部之風速通常稱之為梯度風速(gradient wind)。

一般風工程之應用所涉及的問題大都發生在較強的風勢情況下，近地表上數百公尺高度的大氣邊界層範圍之內。在強風的情況下，大氣機械紊流作用遠超過熱對流作用。由於紊流之強制混合趨向於形成中性層差。本節對大氣邊界之討論僅限於中性層差之大氣邊界層。大氣邊界層之厚度，在中性層差的情況下，視風之強度、地表之粗糙程度及所在之緯度而定，通常在數百公尺至數公里之間。

銜接風洞物理模擬之結果與實場可能發生之狀況的一個很重要的關鍵要求，就是對實場邊界層逼近流的正確模擬。通常對邊界層內之紊流來流都假定其為統計平穩(statistical stitionary)。基於這個假定，任何一點的紊流速度可以用概率及頻譜之方式來描述。這包括平均、均方根流速及頻譜能量，對一個充分發展、穩定，在順風向及橫風向均勻之流場，其流場之統計特性，僅只在垂向上有變化。

#### (一)平均風速剖面

一般常用規範邊界層風速剖面的有兩定律，一為指數律(power law)，另一則為對數律(logarithmic law)。

##### (1)指數律(power law)

就傳統上風工程之應用而言，水平方向均佈之地形的平均風速剖面，是用指數律表示：

$$\frac{U(z)}{U_\delta} = \left( \frac{z}{\delta} \right)^\alpha \quad (2.11)$$

式中  $U$ ：縱向平均風速； $z$ ：地表上高度； $U_\delta$ ：梯度風速； $\delta$ ：大氣邊界層厚度； $\alpha$ ：指數。近似之假定為：

a. 一個  $\alpha$  為定值之指數律可適用至梯度高度  $\delta$ ；及

b. 邊界層厚度  $\delta$  僅只為指數  $\alpha$  的函數。

## (2) 對數律(logarithmic law)

越接近地表的地方，其風速的擾動性越高，解析描述也就越加困難。在地表層(surface layer，或稱之為常應力層  $0 < z < z_i$ ，其厚度約為邊界層厚度之百分之十，即  $z_i \approx 0.1\delta$ )其剪應值  $\tau_u$  與地表面之剪應力值  $\tau_0$  極為接近，且其橫風向之風速分量  $V$  極小。對邊界層順風向及橫風向之平均風速方程積分至高度  $z_i$ ，再加以整理可得：

$$z_i = b \frac{u_*}{f} \quad (2.12)$$

式中  $u_*$ ：剪力風速  $= (\tau_0 / \rho)^{0.5}$ ； $f$ ：科氏力參數； $\rho$ ：空氣密度； $b$ ：常數，其值約在 0.015 至 0.03 之間。

近期微氣象學研究的一些結果顯示，在地表層其平均風速剖面可以下式表示

$$U(z) = \frac{1}{k} u_* \ln \frac{z}{z_0} \quad (2.13)$$

式中  $k$  ( $\approx 0.4$ ) 為 von Karman 常數； $z_0$  為地表粗糙長度(roughness length)。式(2.18)即為通常所稱之對數律。實場量測結果(Carl, Tarbell & Panofsky, 1972)指出，在強風之情況下，對數律之適用範圍可達數百公尺之高度。

## (二) 紊流特性

紊流強度是紊流擾動流速大小的表達方式。將擾動風速之均方根值(root mean square)除以平均風速值，以百分比之方式表達出來，邊界層中等特定高度  $z$  之紊流強度，其定義如下：

$$T_i(\%) = \frac{(\overline{u_i^2})^{0.5}}{U_i} \times 100\% \quad (2.14)$$

$T_i(\%)$ ： $i$  方向上之紊流強度； $u_i$ ： $i$  方向上之擾動風速； $U_i$ ： $i$  方向之平均風速。縱向擾動風速之均方值與地表剪應力風速有下列關係：



$$\bar{u}_1^2 = \beta u_*^2 \quad (2.15)$$

$\beta$  值通常假定與高度無關。在一般工程應用上可取為 0.6。在非常粗糙的地況下,其值可低達 0.4。

### (三) 紊流脈動速度之功率譜

脈動速度之動能量  $\overline{u'^2}$  經由傅立葉轉換由時間域進入頻率域。

$$S_u(n) = d(\overline{u'^2}(n))/d_n \quad (2.16)$$

式中  $S_u(n)$  為縱向功率譜密度函數,  $\overline{u'^2}(n)$  為在頻率  $n$  之能量密度。將  $S_u(n)$  對所有頻率積分可得到總體均方脈動速度  $\sigma_u^2 = \overline{u'^2}$ 。吾人可應用泰勒假說將頻率軸  $n$  轉換為波數(wave number)軸  $n/U$ 。利用這個轉換, 可以從波長 ( $\lambda = \frac{U}{n}$  概括籠統地代表紊流中大大小小渦流之尺寸) 這個角度來詮釋紊流之能量分佈。如將  $nS_u(n)/\overline{u'^2}$  對  $n/U$  以雙對數軸之方式繪出, 則慣性次階(inertial subrange)應為一具有 -2/3 斜率之直線。波長為  $\lambda_p$  代表具有最大能量之渦流則應該在曲線的峰段。

## 2.2 煙流運動之物理模擬

除了前述對大氣邊界層來流之模擬之外, 對煙流在釋放源之條件也必須做適當之模擬考慮。

根據 Kline(1965)所提出之相似理論, 相似參數可以從對原型與模型間之質量比(mass ratio), 力量比(force ratio), 能量比(energy ratio)及性質比(property ratio)之論證中得到。對煙流之動力行為進行考慮時, 吾人可以得到下列之一些重要無因次化參數(Halitsky, 1969; Hoot, Meroney & Peterka, 1974; Hall, 1977; Skinner & Ludwig, 1978; Snyder, 1981):

### 1. 比重(specific gravity)

$$(S.G) = \frac{\text{density of source gas}}{\text{density of air}} = \rho_s / \rho_a$$

2. 質量通量比(mass flux ratio)

$$(M) = \frac{\text{mass flow of plume}}{\text{effective mass flow of air}} = \frac{\rho_s Q}{\rho_a U_a L^2}$$

3. 動量通量比(momentum flux ratio)

$$(F) = \frac{\text{inertia of plume}}{\text{effective mass flow of air}} = \frac{\rho_s Q^2}{\rho_a U_a^2 L^4}$$

4. 相對於空氣慣性之密度福祿數(densimetric Froude number relative to the inertia of air)

$$(F_r)_a = \frac{\text{effective inertia of air}}{\text{buoyancy of plum}} = \frac{U_a^2}{Lg(\rho_s - \rho_a)/\rho_a}$$

5. 相對於煙流慣性之密度福祿數(densimetric Froude number relative to the inertia of plume)

$$(F_r)_s = \frac{\text{inertia of plume}}{\text{buoyancy of plum}} = \frac{Q^2}{L^5 g(\rho_s - \rho_a)/\rho_s}$$

6. 通量福祿數(flux Froude number)

$$\left( \dot{F}_r \right) = \frac{\text{momentum flux of air}}{\text{buoyancy of momentum flux of plum}} = \frac{U_a^3 L}{Qg(\rho_s - \rho_a)/\rho_a}$$

7. 體積通量比(volume flux ratio)

$$(V) = \frac{\text{volume flow of plum}}{\text{effective volume flow of air}} = \frac{Q}{U_a L^2}$$

上述各參數都得到模擬的一個必要條件就是在煙流的整個歷程中其比重  $\rho_s/\rho_a$ ，必須在原型與模型間保持相等。但是保持煙流比重相等之要求導致了一系列的問題，這包括有：

(1) 由於風速的縮尺必須滿足  $U_m = \left(\frac{L_m}{L_p}\right)^{1/2} U_p$ ，對大部分常態性的大氣運動

風速來說，此一要求可能導致模擬風速失去它的雷諾數不變性。解決這個問題的方法不外乎是使用更大的物理模擬設備以便容納更大的模型或者在上述各參數相似的要求上做一些妥協與扭曲。

(2) 大氣中的熱力煙流(thermo plume)，在實驗室中通常是使用具有適當分子量的，與大氣溫度相等的氣體來模擬。使用這種技巧，在一些情況下，當煙流逐漸與周遭空氣混合的情形下，在原型與模型間會造成在煙流密度相等的這一個要求上的一些變化。

所以，很重要，對每一種情況在不至於失去太多所欲模擬煙流結構的相似性之原則下，必須仔細評估，以決定是否可採用一些近似的模擬方法。

## 2.2.1 煙流運動之近似模擬

### 2.2.1.1 煙源密度比相等要求之放鬆

在實驗室以風洞從事物理模擬實驗中，低風速除了會產生雷諾數不變性之問題外，對絕大多數之風洞而言也附帶產生了在操作上難以維持一個穩定流場之問題。放鬆煙源密度比相等之要求固然可以提高模型測試時的風速，但是也產生其他參數無法同時都能得到滿足的問題。所以對所研究的煙流擴散問題必須決定是由哪些參數所主控而做有選擇性的滿足。

對初始動量很小之地面釋放濃煙流，一般認為其主要影響參數為相對於空氣之密度福祿數， $F_{ra}$  及體積通量比  $V$  (見 Hall, 1977; Janssen, 1981; Neff & Meroney, 1981; Neff, 1989)。由於煙流之動量可以忽略，而且通量福祿數  $\dot{F}_r (= \frac{F_{ra}}{V})$  相等，所以唯一被忽略之參數為質量通量比， $M$ 。採用

此一技巧，不帶有地形及尾跡的影響，在  $\rho_s/\rho_a < 2.0$  的情況下，Neff(1989) 發現會造成相當大的誤差。

#### 2.2.1.2 初始動量可忽略之煙流模擬

在煙源之初始動量非常小的情況下，可以採用一個變通的方法，而乃能保持煙源密度比  $\rho_s/\rho_a$  相等的要求。此法假定通量福祿數  $F_r$  為唯一的主控參數，但是附帶條件是體積通量比， $V$  不得過度扭曲。Neff(1989) 發現在重煙流的模擬實驗中採用此一技巧能得到令人相當滿意的相似結果，這使得重煙流的物理模擬範圍擴大了許多。

#### 2.2.1.3 流場長度尺度被扭曲下的煙流模擬

對一個模擬邊界層來流，如何選擇其特徵長度尺度本來就具有一些爭論性。一般用來做為邊界層的特徵長度尺度包括有：

- $Z_0$ ：粗糙長度；
- $\delta$ ：邊界層高度；
- $L_{ux}$ ：紊流之縱向積分長度尺度；
- $\lambda_p$ ：能譜中之尖峰波長；

這些縮尺長度的界定，則因為量測技術的優劣及計算之方法不同而有相當大的伸縮性。

由於煙流之擴散過程主要是由紊流中一小部分長度尺度之渦漩運動所主控，因而在做物理模擬時可以從模擬的長度尺度上做一些變動。這就對提高測試風速提供了一個可行性，亦即，對所模擬的風場，採用一個較大的長度尺度。此一技巧只在邊界層底層一小部分內進行的重煙流擴散模擬實驗尤為可行。Neff(1989) 將不同縮尺的重煙流釋入同一流場中，發現在無地形及尾跡影響的情況下，此法對地面排放之重煙流的近場擴散行為能模擬得相當好。

#### 2.2.1.4 浮昇力不守恒情況下的煙流模擬

在煙流的擴散過程中，可以改變煙流密度的熱效應包括有：

- (1.) 在煙流界面經由傳導，對流與輻射的熱傳導作用；
- (2.) 因捲增(entrainment)濕空氣而釋放出的潛熱(latent heat)；及

---

(3.) 因煙源氣體與空氣之克分子熱容比(molar specific heat capacity)不同而導致之煙流擴張與收縮效應。

即使是液化天然氣之煙霧，通過煙流界面的熱傳遞通常是非常小(Neff & Meroney, 1981)，所以對煙流的浮昇力不致造成顯著的影響。

因為捲增濕空氣而釋放出的潛熱，可對熱力煙流的密度造成顯著的影響(Neff, 1989)。在實驗室內以等溫物理模擬之方式進行濕空氣與冷煙流之混合煙流擴散實驗，其結果可能會有顯著的差別。

至於煙流與周遭空氣因克分子熱容比的差異造成的效應，在以下兩種原型煙流中：

(1) 等溫煙流；

(2) 主要是由空氣所組成之熱力煙流，

不論是以等溫或不等溫之方式來模擬其密度比，只要在原型與模型間保持其初始密度比相等(Neff, 1989)，在結果上，不應該造成任何差別。像是液化天然氣等之熱力煙流，其克分子熱容比與空氣不同，則只能以近似的方式來模擬煙流內密度的變化過程。但是對液化天然氣煙流捲增乾空氣的擴散行為以等溫模擬方式進行模擬，雖然不是絕對的相似，但對其真正的活動狀態應該是極其相近。

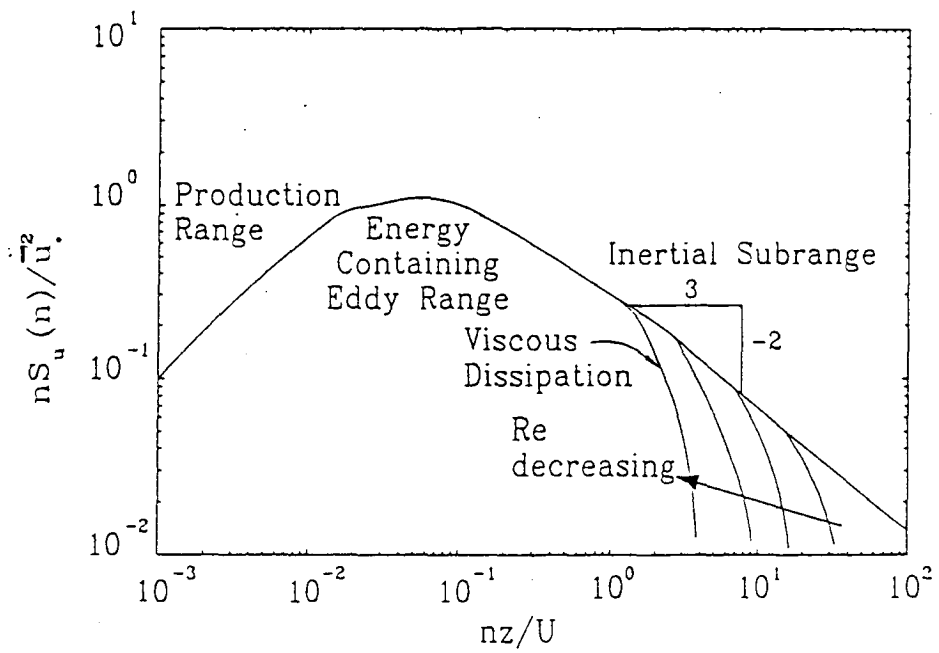


圖 2.1.1 紊流頻譜之雷諾數變化特性(摘自 Neff,1989)

### 第三章 實驗設計、實驗設備及儀器配置

本章討論在本研究案中所使用之實驗設備，量測技巧及配合研究之需求所做之一些實驗設計。本章所涉及之內容在大氣環境與風力工程之應用研究中，大都已發展至相當成熟的地步，並且得到廣泛的使用，所以只需做概括性的陳述。

#### 3.1 風洞設備

本案物理實驗所使用之風洞設備為淡江大學第一號邊界層風洞，該風洞屬於吸入、開放型，如圖 3.1.1 所示。

風洞實驗段長 18.0 m，其斷面寬 3.2 m、高 2.0 m，風洞頂板高度可分七段調整，其最大調整高度為 0.4 m。十六槳葉之軸流式風扇 (axial fan) 其直徑為 2.2 m，由具 175 匹馬力之直流無段變速馬達帶動。風速可經由控制風扇之轉速而得到調整，其自由流之流速範圍為 0.7 m/s 至 16 m/s。風洞進口段之收縮比為 4:1，進口段設有蜂巢管及四層之阻尼網 (dumping screen)，風洞內自由流之紊流強度均為 1%。

在風洞實驗段距進口 13.5m 處設有直徑 3 m 之旋轉工作平台 (turn table)。平台採雙層設計，有效地解決了一般風洞所經常帶有之氣密性問題。平台可經由電腦操控轉動，其數位式角度計之量測精度可達  $\pm 0.1^\circ$ 。實驗段裝有一台三軸向之載具天車，可透過數位式天車之操作，整個實驗段進行量測。旋轉台之一側設有觀測室，可透過大型之加強落地窗戶對實驗進行觀測記錄。

開放式邊界層風洞是設計應用於研究中性穩定邊界層之大氣擴散與風力工程問題。根據 Cermak 與其他專家之意見 (Hunt & Femholz, 1975)，其最佳尺寸為實驗段長 20 m，寬度至少為 3 m，高度約 2 m，最高風速應在 10 m/s 以上。表 3.1.1 顯示當今世上此一類及風洞之主要參數。與西方主要大學和風工程顧問公司風洞實驗室之風洞設備相比，不論在設計理念以及尺寸規格、性能等之要求上，顯而易見，淡江大學之邊界層風洞不但毫無遜處，在許多方面上甚至具有凌駕之勢。

## 3.2 流場之模擬與量測

### 3.2.1 逼近流之模擬方法

大氣邊界層之物理模擬，通常是使用大型之邊界層風洞在其長試驗段上進行。原則上是在最短之吹程內建立最厚之邊界層，並要求邊界層在試驗段內須在一種平衡狀態。有關於在風洞內模擬大氣邊界層所涉及之問題，在 Davenport & Isyumov(1967)及 Cermak & Arya (1970)之論文中有詳細之討論。一般而言，於風洞上底板之鋪以粗糙元(roughness element)，讓邊界層自然發展形成，此法能得到最佳之模擬效果。但是，以西安大略大學(University of Western Ontario)之 25 m 長試驗段之風洞為例，鋪以 2.5~10 cm 之方塊粗糙元(模擬城市地表狀況)，所得之邊界層厚度約為 90 cm；鋪以地毯(模擬鄉村地表狀況)，則僅約 38 cm。相應之模型比例分別為 1/400 及 1/1000。所以，一般吹程較短之風洞，都有必要在試驗段之進口處設置：(1)主動設施，如 directional jets 或 counter jets 或 (2)被動設施，如阻流板(spires)、網格板(grid)、角形渦流發生器(vortex generators)等來輔助厚邊界層之形成。對這些被動設施及配套之粗糙元之選擇、大小尺寸之決定大都憑直覺、經驗，以試誤法來得到。

就現今的知識及技術能力而言，欲於風洞內產生可接受之模擬大氣邊界層，最可行的方法是採用錐形擾流板(spires)與粗糙元搭配之方法。此法一般而言，能得到令人較為滿意之平均風速剖面及紊流特性。本案研究計劃中所使用之模擬大氣邊界層即以錐形擾流板及配套之粗糙元及「龍齒」渦流發生器之組合在風洞試驗段內建立一能與實場相當之模擬大氣邊界層來流（參見圖 3.2.1）

### 3.2.2 風速之量測

本實驗風速量測所使用之儀器包括有（見圖 3.2.2）

- 1.皮托管(pitot-static tube) — 用於風洞內風速之監控。
- 2.熱風速儀 (thermal anemometer) — 用於對邊界層風速剖面及紊流特性之量測。此套 TSI 公司生產之熱風速儀量測系統包括有：
  - (a) IFA-300 智慧型恆溫式(constant temperature)風速儀(anemometer)；



(b) model 1210-20 一般用途熱膜探針(hot film probe)；

(c) model 1241-20 “X”型熱膜探針(“X” probe)；

(d) model 1125 探針率定器(probe calibrator)。

探針是採用 TSI Model 1125 探針率定器依照廠商所設定之標準程序進行率定(TSI,1997)。探針經過率定後可得到探針回饋電壓和風速間之切確關係。有效風速， $V_{eff}$  ( $V_{eff} = V \cos \alpha$ )， $V$  為來流風速， $\alpha$  為來流與垂直於探測元軸線之夾角)為電橋電壓  $E$  之函數。基本率定中兩者之擬合曲線，可以下一多項式表示：

$$V_{eff} = K + AE + BE^2 + CE^3 + DE^4 \quad (3.1)$$

式中之係數  $K$ 、 $A$ 、 $B$ 、 $C$  及  $D$  可以在率定中得到。

量測與率定時因溫度之差別對電壓所產生之影響可以下式修正：

$$E = E_b \times \sqrt{\frac{T_s - T_c}{T_s - T_e}} \quad (3.2)$$

$E_b$  : 電橋之輸出電壓

$T_s$  : 探測元之操作溫度( $\sim 250^\circ\text{C}$ )

$T_c$  : 率定時之溫度

$T_e$  : 測試時之溫度

量測與率定時因大氣壓力改變(流體之密度亦隨之改變)而對所量測到流速的影響可以下式修正：

$$V_{eff(cor)} = \frac{P_c}{P_e} \times V_{eff} \quad (3.3)$$

$P_c$  : 率定時之大氣壓力

$P_e$  : 測試時之大氣壓力

$V_{eff(cor)}$  : 經過密度修正後之有效流速

由風速儀所輸出之電子訊號經過類比/數位轉換器(A/D converter)由電腦系統讀取而後進行計算、分析及紀錄、存檔。

測試時探針是架設在風洞內由電腦所控制之載具天車上，天車可在三個軸向上作獨立之移動。探測元之軸線呈水平且與逼近流之流向垂直。

### 3.3 煙流之模擬與量測

#### 3.3.1 煙源

對重煙流之模擬，本研究案是以等溫之方式，亦即以較重分子量之混合氣體來模擬  $\rho_s/\rho_a$  之變化。煙流計有四種比重， $\rho_s/\rho_a=1.0, 1.2, 1.35$  與  $1.53$ ，其混合方式如下：

	氣體 分子量	C3H8 44	CO2 44	Air 28.8	H2 2
比重	百分比				
1.0		0.06		0.91	0.03
1.2		0.06	0.32	0.62	
1.35		0.06	0.605	0.335	
1.53		0.06	0.94	0	

#### 3.3.2 釋放系統及採樣點之佈設

3.3.1 節中所述之各混合氣體中各組成氣體之百分比是經由分別之單管浮子流量計(single tube flowmeter)所控制非標準狀況及非空氣之流體其相等於標準狀況下之空氣流量可以下式計算得到：

$$Q_{air} = K_{gas} \times Q_{gas} = \left( G \times \frac{T_{act}}{T_0} \times \frac{P_0}{P_{act}} \right)^{\frac{1}{2}} \times Q_{gas} \quad (3.4)$$

式中  $Q_{air}$ ：標準狀況下之相等空氣流量；

$Q_{gas}$ ：所用氣體之流量；

$G$ ：所用氣體之比重；

$T_{act}$ ：使用狀況之絕對溫度 (°k)；

$T_0$ ：標準狀況時之絕對溫度 (°k)；

$P_{act}$ ：使用狀況之大氣壓力；

$P_0$ ：標準狀況下之大氣壓力 (14.7psia)。

由釋放閥門所控制之氣體經混氣管混合後，經由煙流源之排放口排放入風洞之試驗段內。

煙流源為內徑，D，分別為 7.2cm，7.9cm，8.7cm 及 10.0cm 之塑料空心圓柱體，其上方覆蓋有一層孔隙度約為 80% 之不銹鋼網。柱體下方除將混合氣體引入之導管外完全封閉。柱體內裝有二層之散佈板 (spreader plate)，以保證釋放源氣體從金屬網進入風洞時速度均勻無噴流之現象發生。此柱體被安裝在風洞測試段的底板上，金屬網端與風洞之底板切齊。

示蹤氣體之採樣點，包含背景濃度採樣點二個、煙流釋放源採樣點一個及煙流地表濃度採樣點 57 個，共計 60 個。採樣點佈設之位置 (圖 3.3.1 (a) (b))，圍繞釋放源呈放射狀分佈，分為 5 層。各層各點之距離以特徵長度尺度為單位，故各採樣點相對位置不因縮尺之改變而有所不同。

### 3.3.3 示蹤氣體之採樣與分析

示蹤氣體之採樣與分析是由一架淡江大學所自行設計之氣體採樣系統與一架氣相層析儀 (gas chromatograph) 經由介面板併入由電腦所控制之中心數據採集、處理、分析及結果展示系統。

如圖 3.3.2 所示，淡江大學所自行設計製造之氣體採樣系統是一架先進之採樣系統，它可同時採集 60 個樣本，所採樣本不為外界環境所污染，表現穩定，能在相當寬之濃度範圍內採集到重複性高之樣本，對採樣器，淡大之風洞實驗室設有標準之檢定程序，以確保採樣器之性能表現。

單管 (single column) 氣相層析儀包括有：

1. 火焰離子化偵測器(flame-ionization detector)
2. 自動溫度控制器(automatic temperature controler)
3. 差分電表(differential electrometer)
4. 流動系統(flow system)- 包括壓力調控及壓力表(pressure regulator and pressure gauge)

氣相層析儀使用前之率定包括有經由標準濃度之混合氣體，以及實驗室所自行混和之不等濃度之氣體進行系統之線性 - 非線性反應之率定，以及零點偏移量 (zero shift) 之確定。

所能量測到之濃度下限，由儀器之靈敏度及背景濃度 (background concentration) 所定。在整個濃度之測試過程中，背景濃度之量測都包括在內，每一測點之濃度值都經由背景濃度加以修正。

所量測到之濃度值  $C_{mea}$ ，(單位為 ppm)，背景濃度值  $C_{bg}$ ，以及釋放源濃度值， $C_s$  可經由下式轉變為模型之濃度係數， $C_m$

$$C_m = \frac{C_{mea} - C_{bg}}{C_s} \quad (3.4)$$

### 3.4 煙流可視化方法

煙流可視化是將煙源之混合氣體通過內含四氯化鈦之容器而後經由煙源釋放器釋入測試之流場內，混合器體內之水氣與四氯化鈦相互作用產生白色微小之氧化鈦浮懸粒子，煙流及濃度可經由閥門加以控制。

做煙流可視化實驗時，風洞內之底板是鋪以繪有 10cm 見方網格之塑料薄板。觀測之結果是以照相之方式記錄，照明是由三盞照相用之高強度燈光所提供。

### 3.5 地形、地物之模擬

本案研究重點在探討在有地形及尾跡影響下，將邊界層來流之長度尺度進行扭曲對地面排放之重煙流的進場擴散行為所造成的影響。所採用之地形模型為理想化之二維山脊地形，其橫截面為一等腰三角形，高與底寬之比為 1：6。高度與相應之煙流釋放源內徑相似，亦即分別為 7.2cm，7.9cm，8.7cm 與 10.0cm。理想化之三維建築模型為一方塊，其高度亦分別與相應之煙流源內徑相等。模型以保麗龍塑料做成二維山脊與三維方塊模型分別安置在煙流源之正上風位置。模型之下風緣距煙流源之中心距離為 2.0D。

表3.1.1 主要開放式風洞一覽表

	<u>試驗段</u>			<u>收縮比</u>	<u>馬力</u>	<u>速度</u>	<u>紊流度</u>
	長(m)	寬(m)	高(m)		(Hp)	(m/s)	(%)
T.K.U.	18.00	3.20	2.00	4 : 1	175	1~16	1.0
C.S.U.	17.42	3.66	2.13	2.8 : 1	50	1.3~12	1.0
U.of W. Ontario	24.38	2.40	1.68	—	—	0~15.3	—
Oxford U.	14.00	4.00	2.00	2.8 : 1	—	0~30	—
EPA	18.30	3.70	2.10	2.8 : 1	100	0~8	0.5
CPP	22.71	3.66	2.13	—	20	0~9.1	—
RWDI	13.00	2.40	1.90	—	—	—	—

T.K.U.淡江大學；C.S.U.科羅拉多州立大學；U.of W. Ontario 西安大略大學；Oxford U.牛津大學；EPA 美國環保署；CPP, Cermak Petreka Petersen 風工程顧問公司；RWDI, Rowan Williams David&Irwin 風工程顧問公司

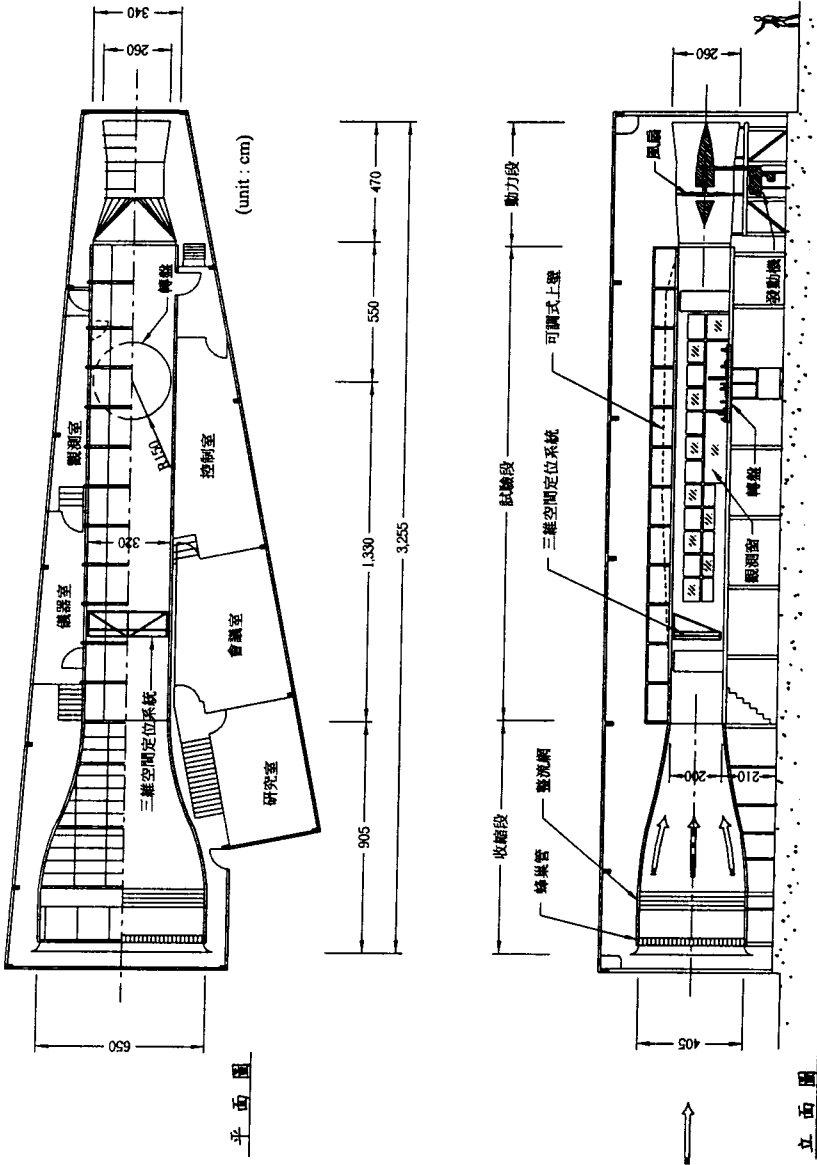


圖 3.1.1 淡江大學第一號邊界層風洞平面立面圖

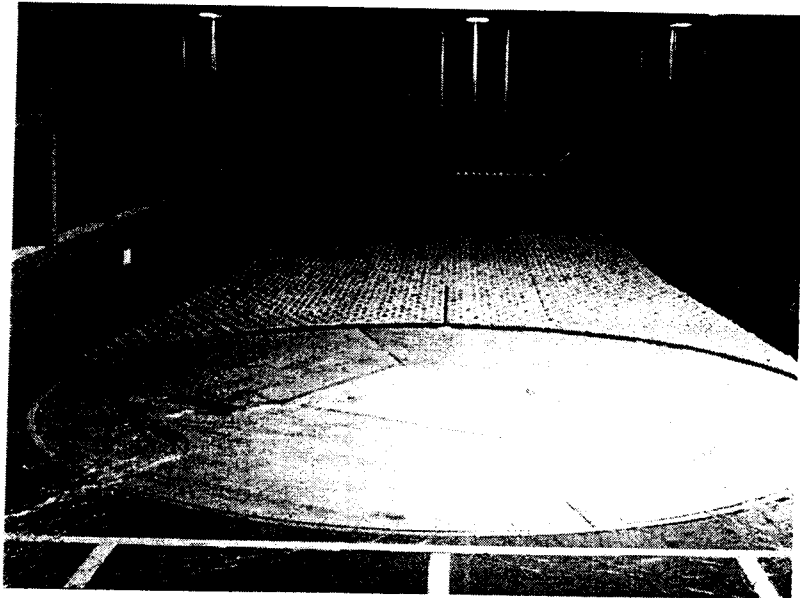


圖 3.2.1 邊界層流場配置方式（圓盤前緣為流場擴散特性檢驗之煙囪）

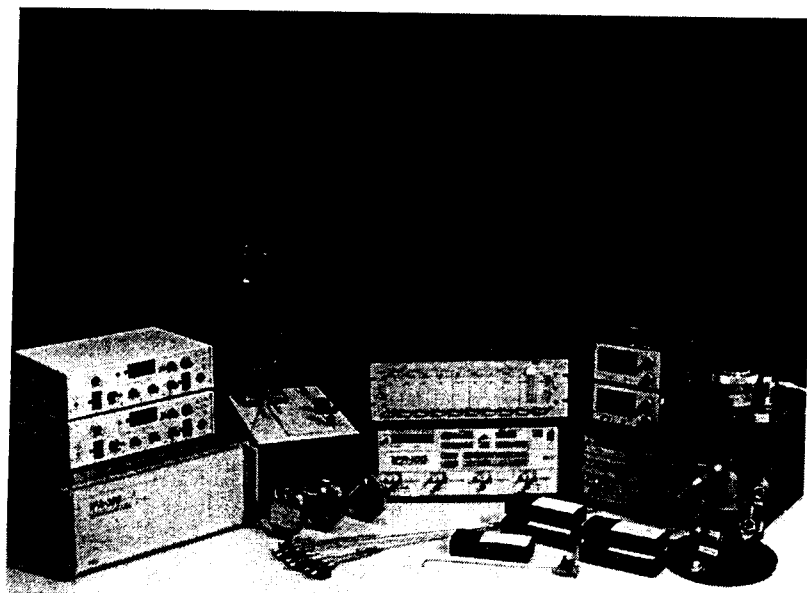


圖 3.2.2 風速量測系統



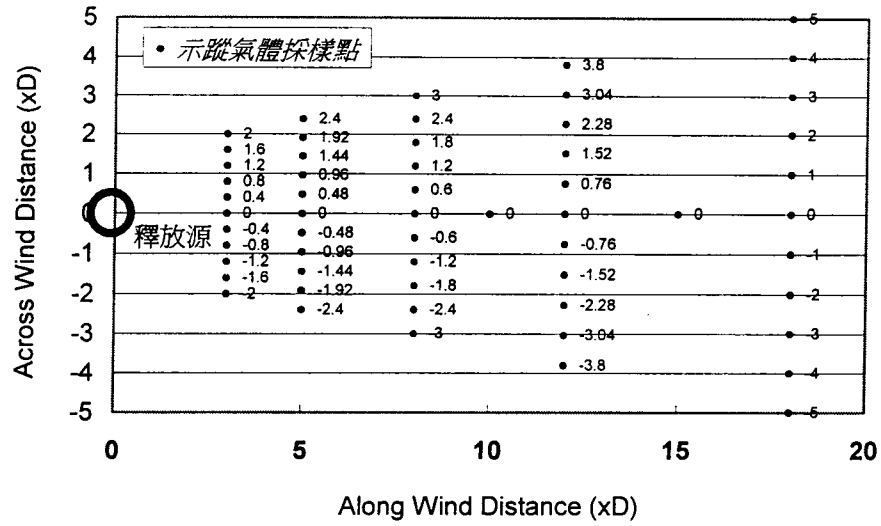


圖 3.3.1 (a) 示蹤氣體採樣點配置圖

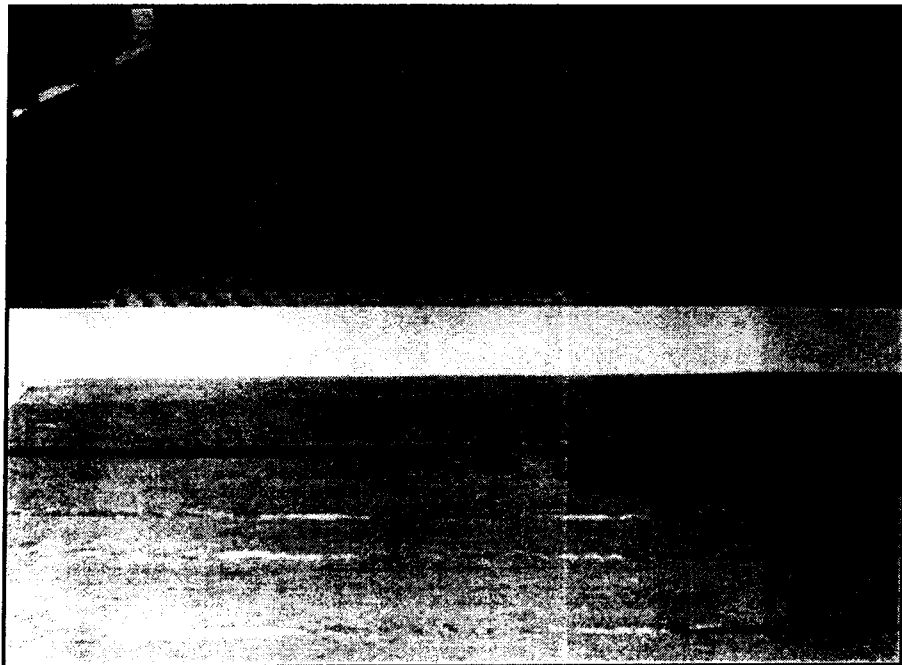


圖 3.3.1 (b) 示蹤氣體採樣點示意圖

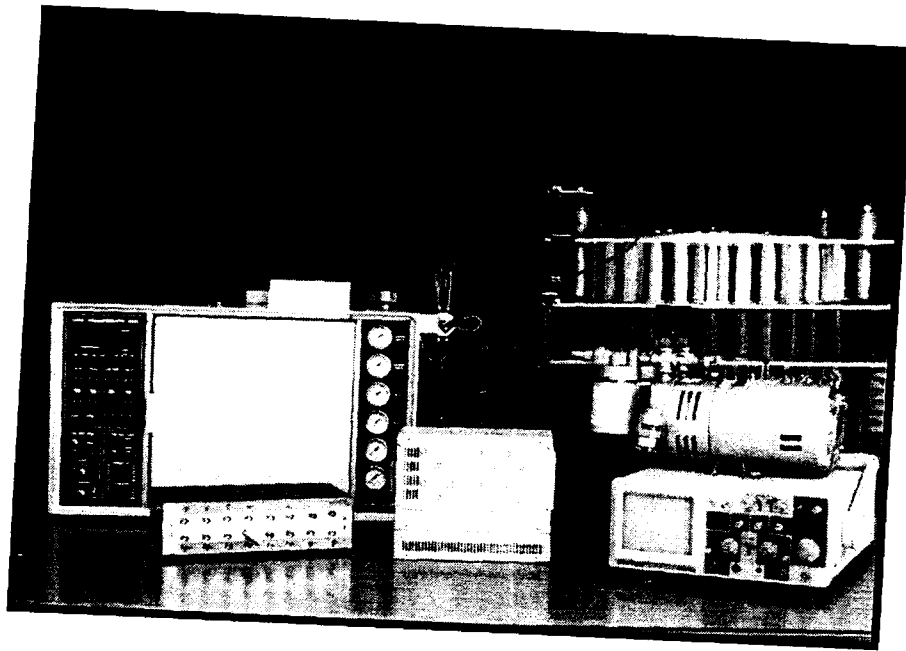


圖 3.3.2 示蹤氣體採樣及分析系統

## 第四章 數學模式

### 4.1 DEGADIS 模式

DEGADIS(Dense Gas Dispersion)模式原受美國海岸防衛隊和 Gas Research Institute 之資助而發展(Havens and Spicer, 1985)，該模式初期只用於模擬靠近地面排放、無初始動量的面源重氣體，在平坦地形的大氣邊界層中擴散的情形。後來在 2.1 版中增加重氣體所產生的水平或垂直噴流(jet)或煙流(plume)的計算，其功能更為加強。

DEGADIS 不但可以模擬近場排放源的變化，也可以計算被空氣帶走的污染物擴散所產生的濃度分佈(見圖 4.1.1)。重氣體釋出後，如果其排放速率小於大氣取走速率(take-up rate)，則污染物將直接被氣流帶往下風方向；相反地，如果氣體排放速率大於大氣取走速率，則會在地面上產生一個"二次污染源"(secondary sources)。這個比空氣重的近場污染源，受到重力的作用會往外圍擴展(見圖 4.1.2)，形成地面上薄毯狀的覆蓋物，同時在此二次污染源與空氣接觸的表面，一部份的污染物會隨風而漂向下風方向。

DEGADIS 首先對"二次污染源"進行模擬求出時變(unsteady)或非時變(steady)的各個特性，詳細的計算過程相當複雜，請參考 Spicer and Havens (1989)之報告。由污染源的計算結果，可以求出被帶走的污染物量，作為擴散模式的輸入資料。

DEGADIS 擴散模擬中，假設風速為冪次分佈(power's profile)，在垂直方向濃度的分佈為冪次分佈，水平方向則採用修正的高斯分佈。污染源可視為一寬為  $2B$ ，長度為  $L$  之長方形，其中寬度由下式計算以保持相等面積：

$$\pi R^2 = 2BL$$

濃度分佈則假設在中間部份為均勻分佈，在外側為高斯分佈，其方程式為：

$$c(x, y, z) = c_c \exp \left[ - \left[ \frac{|y| - b(x)}{S_y(x)} \right]^2 - \left[ \frac{z}{S_z(x)} \right]^{1+\alpha} \right] \quad \text{for } |y| > b$$

$$= c_c(x) \exp \left[ - \left[ \frac{z}{S_z(x)} \right]^{1+\alpha} \right] \quad \text{for } |y| \leq b$$

上式中  $x, y, z$  分別代表下風方向的距離、至煙流中心位置的側風方向距離、及垂直高度， $c_c$  為煙流中心位置的濃度， $b$  為煙流中心濃度均勻分佈區域的一半寬度， $S_y, S_z$  則代表側風方向和垂直向的擴散係數。詳細的計算方法請參考使用手冊(Spicer and Havens, 1989)。

## 4.2 SLAB 模式

SLAB 模式可處理連續、有限延時或瞬間排放的情形，而且可考慮四種不同的釋出情形，即：地面蒸發池(evaporating pool)、高處水平噴流(horizontal jet)、煙囪排放(即垂直噴流)、地面瞬間排放等情形。

SLAB 擴散模擬採用兩種計算方法，第一種為連續煙流的模擬(見圖 4.2.1)，此種方法假設煙流由一連串的版塊所構成，利用制御方程式求出各版塊上的平均性質，再求出三維的濃度分佈。第二種則為瞬間的陣噴(puff)，其模擬方法如圖 4.2.2 所示，先利用制御方程式求出各團氣體上的平均性質，再求出三維的濃度分佈。

在煙流模式中，首先求解各個下風位置版塊的平均質量、動量、能量、物種濃度守恆方程式，求出不同下風位置側風方向的平均值，即：

$$(\rho U B h m)' = \rho_s W_s B_s$$

質量

$$(\rho U B h)' = \rho_a (V_e H + W_e B) + \rho_s W_s B_s$$

能量

$$(\rho U B h C_p T)' = \rho_a (V_e H + W_e B) C_{pa} T_a + \rho_s W_s B_s C_{ps} T_s + f_{pc} + f_t$$

x 向動量

$$(\rho U B h U)' = -0.5 \alpha_g g \left[ (\rho - \rho_a) B h^2 \right]' + \rho_a (V_e h + W_e B) U_a + f_u$$

y 方向動量

$$(\rho UBhV_g)' = g(\rho - \rho_a)h^2 + f_{vg} \quad \text{地面污染雲}$$

$$V_g = 0 \quad \text{漂浮的污染雲}$$

z 方向動量

$$(\rho UBhW_c)' = -g(\rho - \rho_a)Bh + f_w \quad \text{地面污染雲}$$

$$W_c = -V_g Z_c / B \quad \text{漂浮的污染雲}$$

半寬方程式

$$UB' = (\rho_a / \rho)V_c + V_g$$

$$Ub' = V_g b / B$$

高度參數

$$UZ_c' = W_c$$

狀態方程式

$$\rho = \rho_a T_a / [\alpha T + \gamma T_a]$$

其中

$$\alpha = M_{ae} \left\{ \frac{m_{da}}{M_a} + \frac{m_{wv}}{M_w} + \frac{m_{ev}}{M_s} \right\}$$

$$\frac{1}{M_{ae}} = \left\{ \frac{1 - m_{wa}}{M_a} + \frac{m_{wa}}{M_w} \right\}$$

$$\gamma = (\rho_a / \rho_{wl})m_{wd} + (\rho_a / \rho_{sl})m_{sd}$$

$$P_a = \rho_a R_c T_a / M_{ae}$$

上面方程式中， $x$  為下風方向距離， $\rho$  為密度， $U$  為污染雲在風向的速度， $B$  為污染雲半寬， $h$  為污染雲高度， $C_p$  為比熱， $T$  為溫度， $f_{pc}$  為相變化能量， $f_t$  為地面熱通量， $V_g$  水平側風重力流速度， $f_u$  和  $f_{vg}$  分別代表下風和側風摩擦力。下標  $a$  代表大氣狀況， $s$  則代表污染源狀況。水平和垂直的捲增(entrainment)速率分別以  $V_c$  和  $W_c$  代表，污染源垂直排放速率為  $W_s$ 。

求解上述制御方程式可以得到側風方向的平均性質和煙流的尺寸

與形狀參數，三維的濃度分佈可利用下面方法求出：

$$C(x, y, z) = 2Bhc(x)C_1(y, b, \beta)C_2(z, Z_c, \sigma)$$

其中

$$C_1(y, b, \beta) = \frac{1}{4b} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{y+b}{\sqrt{2}\beta} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{y-b}{\sqrt{2}\beta} \right) \right]$$

$$B^2 = b^2 + 3\beta^2$$

$$C_2(z, Z_c, \sigma) = \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{1}{\sigma} \left[ \exp \left( -\frac{(z-Z_c)^2}{2\sigma^2} \right) + \exp \left( -\frac{(z+Z_c)^2}{2\sigma^2} \right) \right]$$

$$\sigma^2 = h^2/12$$

$$\sigma^2 = (h - Z_c)^2/3$$

如果是陣噴(puff)則將污染物視為像泡芙一般的氣團，利用下列方程式求出其中心位置各性質的變化：

物種

$$d(\rho B_x B_y h m) / dt = \rho_s W_s B_s^2$$

質量

$$d(\rho B_x B_y h) / dt = \rho_a [(V_{ex} B_y + V_{ey} B_x) h + W_e B_x B_y] + \rho_s W_s B_s^2$$

能量

$$d(\rho U B h C_p T) / dt = \rho_a [(V_{ex} B_y + V_{ey} B_x) h + W_e B_x B_y] C_{pa} T_a + \rho_s W_s B_s^2 C_{ps} T_s + B_s (f_{pc} + f_i)$$

x 向動量(轉移)

$$d(\rho B_x B_y h U) / dt = \rho_a [(V_{ex} B_y + V_{ey} B_x) h + W_e B_x B_y] U_a + B_x f_u$$

x 向動量(重力流)

$$d(\rho B_x B_y h U_g) / dt = g(\rho - \rho_a) h^2 B_x + B_x f_{vg} \quad \text{地面污染雲}$$

$$U_g = 0 \quad \text{漂浮的污染雲}$$

y 方向動量

$$d(\rho B_x B_y h V_g) / dt = g(\rho - \rho_a) h^2 B_y + B_x f_{vg} \quad \text{地面污染雲}$$

$$V_g = 0 \quad \text{漂浮的污染雲}$$

z 方向動量

$$d(\rho B_x B_y h W_c) / dt = -g(\rho - \rho_a) B_x B_y h + B_x f_w \quad \text{地面污染雲}$$

$$W_c = -(V_g / B_y - U_g / B_x) Z_c \quad \text{漂浮的污染雲}$$

質量中心

$$dX_c / dt = U - (\rho_s W_s B_s^2 X_c / \rho B_x B_y h)$$

半寬方程式

$$dB_y / dt = (\rho_a / \rho) V_{ey} + V_g$$

$$db_y / dt = V_g b_y / B_y$$

半寬方程式

$$dB_x / dt = (\rho_a / \rho) V_{ex} + U_g$$

$$db_x / dt = U_g b_x / B_x$$

三維的濃度分佈可利用下面方法求出：

$$C(x, y, z, t) = 4 B_x B_y h c(t) C_1(x - X_c, b_x, \beta_x) C_1(y, b_y, \beta_y) C_2(z, Z_c, \sigma)$$

其中

$$C_1(y, b, \beta) = \frac{1}{4b} \left[ \operatorname{erf} \left( \frac{y+b}{\sqrt{2}\beta} \right) - \operatorname{erf} \left( \frac{y-b}{\sqrt{2}\beta} \right) \right]$$

$$B^2 = b^2 + 3\beta^2$$

$$C_2(z, Z_c, \sigma) = \sqrt{\frac{1}{2\pi}} \frac{1}{\sigma} \left[ \exp \left( -\frac{(z - Z_c)^2}{2\sigma^2} \right) + \exp \left( -\frac{(z + Z_c)^2}{2\sigma^2} \right) \right]$$

$$\sigma^2 = h^2 / 12$$

$$\sigma^2 = (h - Z_c)^2 / 3$$

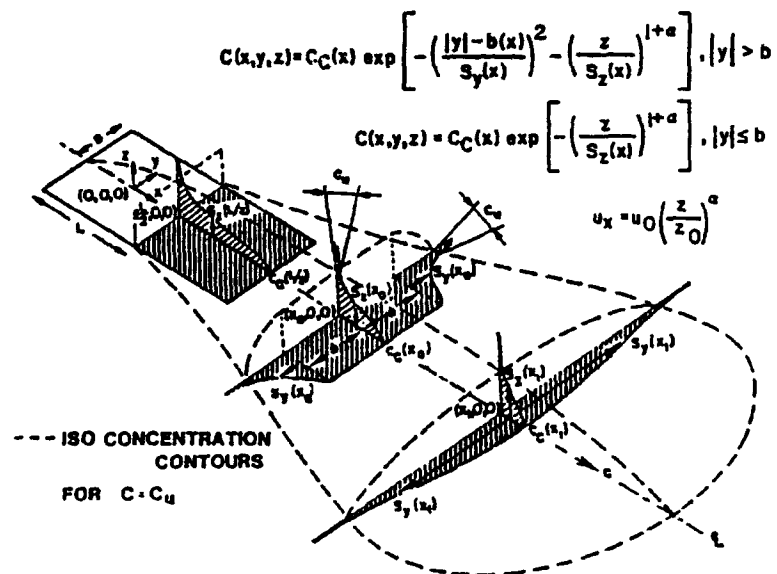
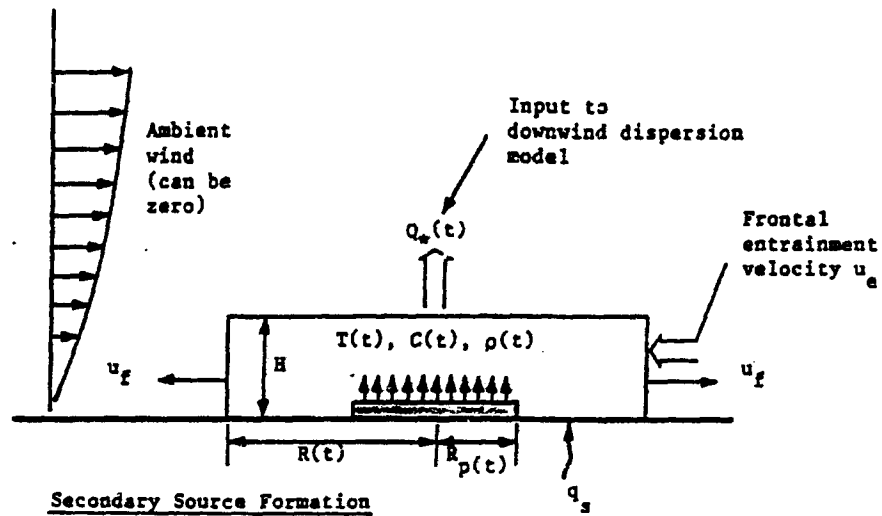


圖 4.1.1 DEGADIS 模式中二次污染源和擴散模擬示意圖



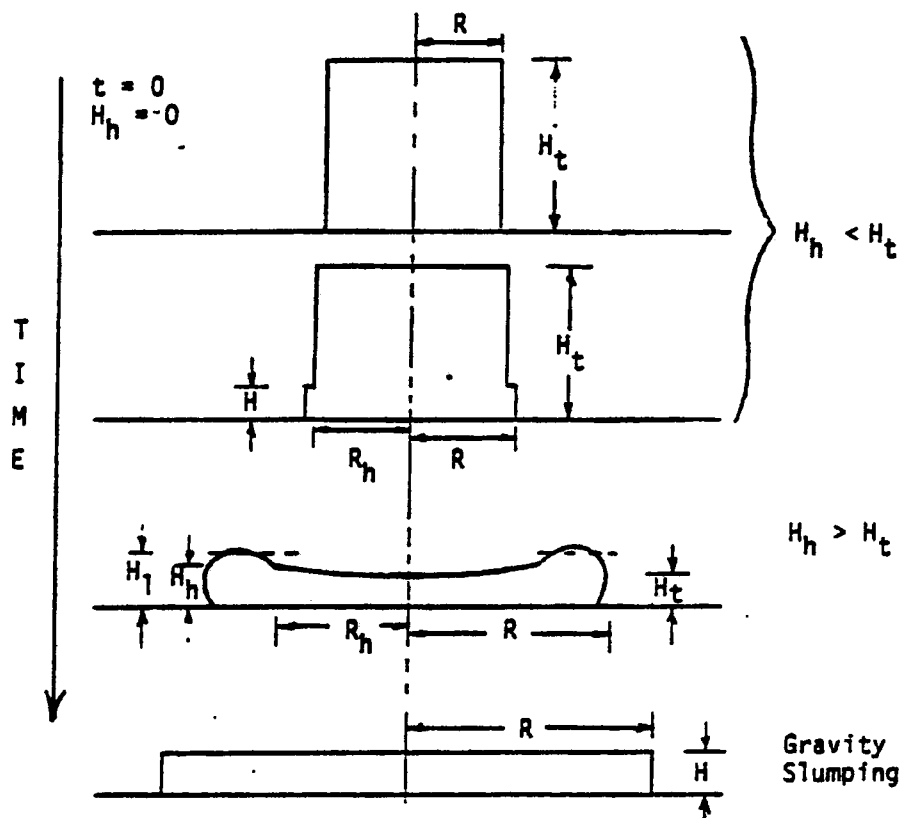


圖 4.1.2 DEGADIS 模式中二次污染源擴張示意圖

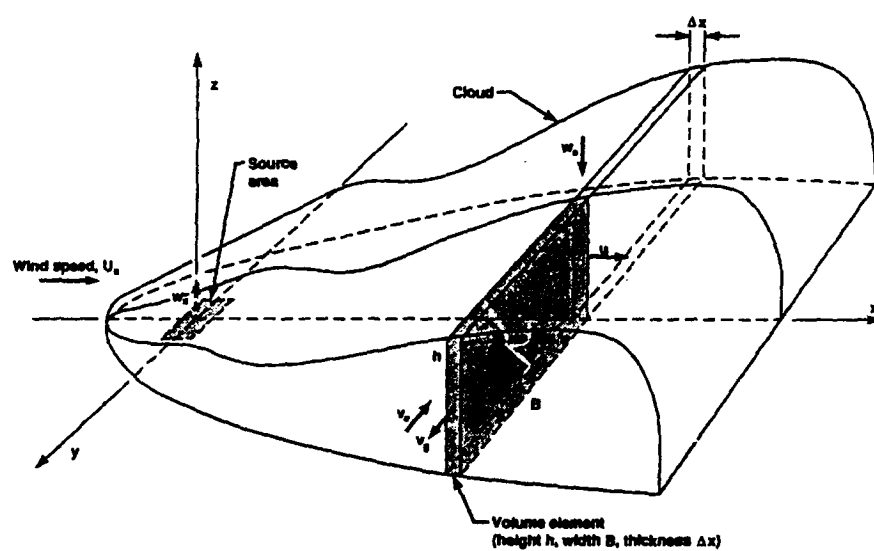


圖 4.2.1 SLAB 模式中連續煙流擴散模擬

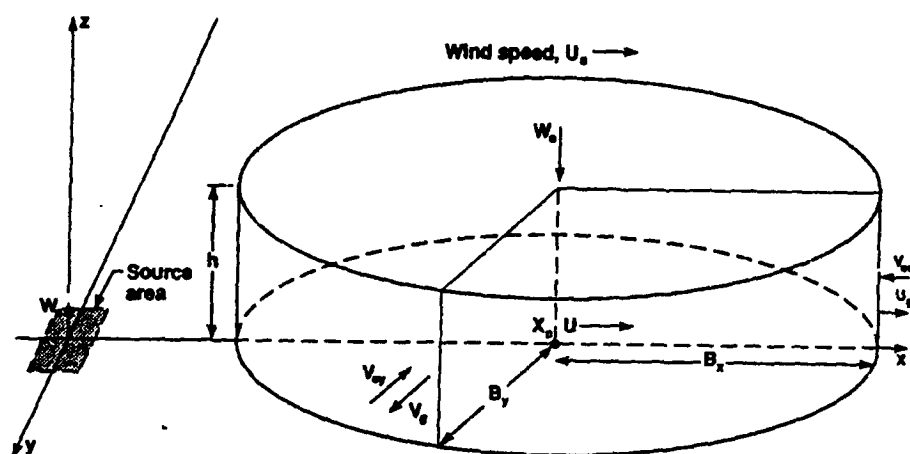


圖 4.2.2 SLAB 模式中陣噴(puff)擴散模擬

## 第五章 結果與討論

本研究計畫案物理模擬部分之工作，主要是利用淡江大學之第一號邊界層風洞從事國內重氣體擴散物理模擬能力的建立與檢定，並且以此技術之建立為基礎，從事一些探索性之研究。其工作重點為：

- (1)發展出一套能代表流經鄉村或低度開發之城鎮的邊界層流；
- (2)在開闊地形的情況下，檢定風洞實驗模擬中煙流之能力；
- (3)於重煙流釋放源之周遭，放置簡單幾何形狀之物體以檢驗在有地形及建築尾跡的影響情況之下，為提高模擬時之風速而對邊界層之特徵長度進行扭曲所產生的影響。

本章就上述工作重點，所做之工作，分節進行陳述。

### 5.1 模擬邊界層逼近流之評估及擴散特性之檢定

圖 5.1.1 顯示縱（順風）方向之平均流速高度變化剖面曲線。所建立之模擬邊界層之厚度（定義為 $\sim 0.99 U_\delta$ ）在轉盤處的為 1.2~1.3m。如將此平均風速剖面曲線以雙對數軸之方式繪出（見圖 5.1.2）。可明顯看出其結果可為兩條、斜率不等之直線所近似取代。在  $0.1 \leq Z/Z_\delta \leq 1.0$  之範圍內（亦即為邊界層之上部 90%）其斜率為（即為 $\alpha$ 值）為 0.181（參見圖 5.1.3）。在  $Z/Z_\delta \leq 0.1$  之範圍內（亦即為邊界層之底部 10%，通常所稱之表面層）可用指數率：

$$\frac{U}{U_*} = 2.5 \ln \frac{Z}{Z_0} \quad (5.1)$$

當  $U_* = 45.6 \text{ cm/s}$  及  $Z_0 = 0.14 \text{ cm}$  時做近乎完美之擬合（圖 5.1.4）。根據 Davenport(1963)，Counihan(1975)及 ESDU(1976)，代表鄉村或低度開發之城鎮之邊界層來流，概略應有下述之特性： $\alpha \doteq 0.18$ ， $Z_0 \doteq 0.3 \sim 0.4 \text{ m}$ ， $\delta \doteq 300 \sim 400 \text{ m}$  如果以這些數據為基礎，則所得之模擬邊界層來流之縮尺約在 1/285 左右。

邊界層橫向流場之均勻性在自由流部分為 $\pm 2\%$ 之內（圖 5.1.5a）。在  $Z/\delta = 1/8$  處均在 $\pm 5\%$ 之內。（圖 5.1.5b）。這個較大的變動部分應歸因於較大之紊流度以及不足之平均時間。以 3.5cm 參考高度之風速（按 1/285

縮尺比例，等於實場 10m 高度之風速)無因次變化之縱向紊流強度  $T_u$ ，垂向紊流強度  $T_w$  二者之高度變化剖面曲線(已轉換為實場高度)與 ESDU(1976)之實場數據分別顯示在圖 5.1.6 及 5.1.7 上。數據顯示在邊界層之底層部分  $U$  及  $W$  兩個分量之紊流強度，其特徵強度應介乎實場地表面粗糙度 0.1 至 0.3m 之間，而以 0.2m 似乎較為適中。如果以實場之 0.2m 來做縮尺之參考。所得模擬邊界層之縮尺比例約為 1/150。但是我們必須注意到 ESDU 之實場數據是在強風情況下所測得，將此結果引伸至重煙流擴散所感興趣之低風速情況，可能會產生不等大小之誤差。

在縱向擾動風速頻譜部分，根據離風洞底板 2.5cm 高度不同風速之量測結果(圖 5.1.8~9)，當風速大於 0.58m/s，在慣性次階範圍是符合斜率 -2/3 之要求。依據此頻譜考慮積分尺度，由 ESDU(1976)可知，在實場 10m 高度， $Z_0=0.1m$  時，其實場  $L_x^* \approx 30m \sim 40m$ ，而本實驗於  $scale=1/300$  之設定下，由離風洞底板高度 3.5cm 處所量測之擾動風速頻譜之尖峰位置(圖 5.1.8)，可求得  $L_x^* \approx 0.08m \sim 0.09m$ ，比較 ESDU 與本實驗之  $L_x^*$ ，可知縮尺為 1/300 附近，與前述設定吻合。

在模擬邊界層之發展工作完成之後，首先進行一組擴散特性之量測工作，用以檢定在轉盤所在之測試段上之流場，其擴散特性是否與實場大氣中之擴散特性相似。

所用之示蹤氣體為甲烷與空氣之混合氣體，經由高度為 20cm，置於轉盤上緣(參見圖 3.2.1)之模擬煙囪釋入邊界層流內。風洞內自由流之風速， $U_0$  約為 2.5m/s。示蹤氣體之排放速度與在煙囪高度處之來流風速比保持在 1.5 以上，以避免有煙囪尾跡之下洗現象。

地表濃度採樣點是分佈在以煙囪為原點，沿著風向之主軸線兩旁展開之扇形面上。在距煙囪 290、390 及 490cm 之距離上各取一弧。第一弧每隔 10cm 設一點，計 11 點；第二弧每隔 8.5cm 設一點，計 20 點；第三弧每隔 9cm 設一點，計 25 點總共為 56 點。

測試結果與最佳之高氏擬合曲線顯示在圖 5.1.10 上。根據此項結果所計算出之煙流在水平方向之擴散係數  $\sigma_y$ ，在 290、390 及 490cm 處分別為 24.96，28.60 及 40.60cm。以 1/285 之縮尺比例繪出。此項擴散特性介於 Pasquill Gifford 曲線(Pasquill, 1974; Gifford, 1968)中之中性(即 stability D)邊界層流與輕微的不穩定(slightly unstable, stability C)邊界層流之間(Turner, 1967)，這種特性，顯然是因邊界層之底部有較高之紊流強度所造成(圖 5.1.11)。

## 5.2 被動煙流擴散之測試結果

被動煙流(中性浮力煙流,neutrally buoyant plumes,煙流比重  $\rho_s/\rho_a$  為 1.0) 之測試目的主要用於:

- (i)決定何時煙源之初始動量 ( $W/U_H$  或  $U_H/W$ ) 開始對下風之濃度產生影響。
- (ii)檢測不同來流之雷諾數對中性煙流之影響;
- (iii)提供詮釋重煙流擴散行為及濃度場一個方便的參考系。

### 5.2.1 煙源之動量效應(momentum effects)

煙源之直徑為 7.2cm,煙源之垂向速度為  $W=0.02456Q$ 。測試時  $U_H$ (即  $U_{ref}$ ,  $Z_{ref}=3.5\text{cm}$ )被設定為 60cm/s,總共測速 8 組煙源之垂向速度,亦即:

測試組	1	2	3	4	5	6	7	8
$U_H/W$	15	20	25	30	35	40	45	50

12 個採樣點設於煙流之中軸線上,具煙流之中心點分別為 2D、3D、4D、5D、6D、8D、10D、12D、15D、18D、21D 及 25D。

在一個相對平坦,而且無尾跡之影響下的擴散濃度,根據 Neff(1989) 可以下式回歸:

$$\left[ \frac{T_s}{T_a} \right] \left[ \frac{X}{1-X} \right] \left[ \frac{U_H L^2}{Q} \right] = K(x) \quad (5.2)$$

式中  $T_s$ ,  $T_a$  分別代表煙源及空氣之溫度,  $X$  為測得之無因次化濃度,  $L$  ( $=Z_{ref}$ ) 為特徵長度。  $X$  (以  $Z_{ref}$  無因次化, 為距煙源中心點之距離)。圖 5.2.1 顯示根據上式所得之結果。Neff(1989)指出, 當  $U_H/W$  小於 17 時,煙流因為煙源之動量效應所導致之擴散性增加的效應開始漸漸出現。本研究案在這項效應的研究量測所得之數據與 Neff 之值極為相似。當  $U_H/W=15$  時數據有明顯的偏離。根據此項結果, 在以下所論及的各項重煙流擴散測試中, 所有之  $U_H/W$  值皆保持在大於 20。

對於相同之  $U_H/W$  比值之煙流而言，由於重煙流具有較大之動量，所以保持  $U_H/W > 20$ ，在模擬的要求上也許會顯得較為不保守。但是這個效應也會被因為煙流之負浮昇力而使煙流跌回煙源本身之作用而抵銷掉。

### 5.2.2 雷諾數之不變性（獨立性）

檢測煙流擴散對雷諾數之獨立性的一個簡易的方法就是將被動煙流釋入一組不同雷諾數之流場中。如果煙流之擴散過程真正為被動狀態（無煙源動量效應），而且其擴散過程具有雷諾數之不變性。則作用在煙流上之捲挾效應(entrainment effect)及下風之擴散濃度分佈曲線應該相似。

對具有尾跡影響之擴散行為，Halisky(1969)將一方塊模型安置在一個近乎均勻的流場中，他發現雷諾數（基於模型高度及在此高度之逼近流速）必須大於 11,000，才能得到濃度分佈對雷諾數之不變性。此一結果在模型測試中被廣為採用引述。據筆者所知，對此一結果（即  $Re \geq 11,000$ ）的驗證，特別是在一個模擬的大氣邊界層流中，所有文獻都無記載。有鑑於此，在煙源之動量效應實驗結束後，在原有之測試安排下，在釋放源（ $D=7.2\text{cm}$ ）正上風距釋放源中心  $2.0D$  的位置處安置一長寬高皆為  $7.2\text{cm}$  之方塊模型，進行了一組包含 6 個不同風速的擴散實驗。因應測試風速的不同，煙流之釋放量亦隨之改變以保持體積通量比（volume flux ratio,  $V$ ）之相等（ $V=0.011$ ），同時  $U_{ref}/W$  亦保持在 72.7 以保證無煙源動量效應。

此項 6 個不同風速（雷諾數）之測試地表等濃度分佈曲線之結果一同顯示在圖 5.2.1 上。就此組試驗而言，在一個模擬的大氣邊界層中，在有尾跡的影響下，地表等濃度分佈曲線，當  $Re \geq 10,000$ （或較不保守一些  $Re \geq 8,000$ ）時已無明顯的變化。當  $Re \leq 8,000$  時其擴散分佈明顯地隨雷諾數之改變而改變。換言之，此時在邊界層之來流中，紊流結構已經無法得到適當的模擬。

由於重煙流的存在會改變「搭載」空氣中的脈動紊流結構。所以被動煙流的雷諾數獨立性的實驗結果不能保證能適用於不同比重的重煙流擴散當中，有關於這點，吾人需要有嚴格模擬（無煙源密度比，體積通量比等之扭曲）之實場數據與風洞物理模擬數據的對比。不幸 China Lake, California 之 LNG 外溢現場實驗的數據(Neff & Meroney, 1979, 1981)，由於氣象資料之不穩定，所以無法針對這點做出任何結論，在現

階段之風洞模擬試驗當中，在無煙源密度比扭曲或扭曲程度不大之前提下，可於實驗計畫之先期先安排一組如上所述之擴散實驗，以決定雷諾數不變性的一個底限。

### 5.3 煙流的擴散特性

如前所述，為了克服在風洞模擬實驗中所經常遭遇到的低風速測試所帶來之技術性、操作上的困難，一個變通方法就是利用模擬邊界層中縮尺比例的不精確性，而將模擬的比例盡可能地提高〈亦即使用較大的模型，所以可以使用較高的測試風速〉。此部份的研究計劃即在探討因為流場長度尺度的扭曲而可能帶來之誤差問題。

根據第 5.1 節之陳述，我們設定風洞內之模擬邊界層其“精確”之縮尺比例為 1/285。以此為基礎，我們在此模擬之邊界層內進行了 4 組不同縮尺比例的模擬測試。同時並考慮在不同之密度比及地形條件所造成尾跡結構不同的影響。整個測試計劃變數包括：

縮尺比例：

1/285（代碼“A”）

1/260（代碼“B”）

1/235（代碼“C”）

1/205（代碼“D”）

煙源密度比：

1.0（代碼“10”）

1.2（代碼“12”）

1.35（代碼“13”）

1.53（代碼“15”）

地形、地物：

平坦地形（flat，代碼“F”）

二維山脊（mountain，代碼“M”）

三維方塊（block，代碼“B”）

總計量取了 48 組之地表擴散濃度分布數據(如附錄 A 中圖 A-1 至圖 A-48 所示)。顧及數據之交互可比較性，於本實驗所有之測試，其體積通量比 ( $V$ )、通量福祿數 ( $F_r$ ) 及  $U_{ref}/W$  皆保持定值，分別為 0.0085、21 及 92.4。在此兩參數中之特徵長度及參考高度分別為釋放源之直徑 ( $D$ ) 及實場 10m 之縮尺高度。

根據 5.2.2 節之結論，維持濃度分佈對雷諾數之不變性的最低雷諾數為 8,000。而本實驗即維持  $Re$  在 8,255 以上，最高達到 22,028，可確保地表濃度分佈對雷諾數之不變性。

以下分別討論地形、密度比及流場長度尺度扭曲對煙流之影響。

### 5.3.1 地形地物之影響

共有三種地形；平坦，二維山脊，三維方塊。以平坦地形無尾跡結構之流場做參考值，而另外二種維度之地形所造成之尾跡，其對煙流濃度之影響，進行討論。其中在不同縮尺之實驗，山脊及方塊之大小隨縮尺而變，但皆維持在與釋放源同一特徵尺度，故其正規化之幾何條件相同。

實驗結果顯示(圖 5.3.1~16)，平坦地形會有煙流濃度最高，橫風向擴散範圍最小之現象。這應該是低擾流度所造成煙流不易與周遭氣流混合、擴散的結果。而且是在垂直向及水平向擾動皆然，由可視化的結果(圖 5.3.17~18)即可發現，平坦地形之煙流未被水平及垂直向之擾動，而使煙流相當集中於中心軸線上。

與平坦地形相較，二維山脊與三維方塊對煙流之擴散則有相當大的影響，這當然是由於釋放源上游擾動性極大之鈍體尾跡，對煙流做劇烈而快速的混合所致。而同在尾跡的作用下，二維山脊與三維方塊也有明顯差異。二維山脊之煙流濃度低於三維方塊，這結果根據煙流可視化分析此二者之流場特性，發現方塊所產生的尾跡(圖 5.3.19~20)，有明顯的三維渦漩，加上空氣流經方塊所產生的負壓區亦間歇性的籠罩釋放源，使煙流因負壓而斷續的向上游移動，再經三維渦漩及渦散作用(vortex shedding)與周遭空氣混合。但其橫風向受擾動之範圍，限制在方塊寬度附近之有限距離。至於二維山脊頂端之鈍角邊緣所形成三維尾跡(圖 5.3.21~22)，雖然其負壓區未明顯籠罩釋放源，但因二維山脊之範圍橫跨整個風洞試驗段，其尾跡影響範圍亦達整個橫風向最大寬度，致



使煙流受到擾動之寬度較三維方塊為大，亦即橫風向煙流分佈範圍加大，故濃度便相對較低。

### 5.3.2 不同密度比之影響

考慮密度比之差異，是希望瞭解擴散機制對不同重量等級煙流之影響性。 $\rho_s/\rho_a=1.0$  則做為比較之參考值。由實驗結果發現(圖 5.3.23~34)，煙流之地面濃度有隨密度比增加( $\rho_s/\rho_a=1.2\sim 1.53$ )而增大的趨勢，但影響有限。由於各組實驗已符合雷諾數不變性及動量效應之要求，此結果可解釋為在此紊流場( $\alpha=0.18$ )條件下，不論在何種地形條件及縮尺比例，煙流密度的增加仍不足以嚴重改變此擴散機制的作用。

另外，當 $\rho_s/\rho_a=1.0$ ，其煙流地表濃度較其他之較重煙流為大，在數值模擬上(平坦地形)亦有相同結果。這可能是 $\rho_s/\rho_a>1.0$ 之煙流會因為密度較空氣大而朝橫風向主動擴散，使其於地表之分佈範圍加大而使濃度降低； $\rho_s/\rho_a=1.0$ 之煙流，其密度與週遭逼近流場之空氣相同，相對的沒有此主動擴散，故煙流較集中於中心軸線上而有較大的地表濃度。

### 5.3.3 流場長度尺度扭曲之煙流相似性

在所發展出之邊界層流中，以 5.1 節所計算之“精確”縮尺比例 1/285 為參考值，將模型之縮尺比例逐漸放大，經 1/260，1/235，至 1/205，其最大扭曲值為 1.28 倍。這個特徵長度尺度(相對於一個模擬之流場)扭曲的技巧，應該在一定的範圍內可用。因為伴隨著長度尺度扭曲程度的增加時，煙流的整個高度會逐漸處於不同的平均流速及紊流結構之下。

整體之測試結果顯示(圖 5.3.35~46)，在平坦地形及在有二維山脊及三維方塊之尾流影響下，對任何一組煙源密度比相似之煙流，其體積通量，及相對於空氣之密度福祿數又在煙流之間保持相似，模型之扭曲至 1.28 倍，對煙流擴散機制尚無造成明顯的影響。這個發現與 Neff(1989)之結果基本上是相容的。在一個相對於本研究案較為平坦，紊流度較低之模擬邊界層流中，在不考慮尾跡的影響下，Neff 的結論為——若一個 1.5 之體積通量扭曲因子容許的話，在這個體積通量的扭曲範圍內，一個 1.5 的長度尺度扭曲因子應該也可以被接受。

## 5.4 平坦地形風洞實驗與模式模擬結果比較

過去有許多研究探討重質氣體擴散模式的適用性，一般而言，模式的計算結果與實驗數據比較大都相當合理。然而用來驗證模式的風洞或外場實驗數據，大都在平坦且粗糙度低的情況下所獲得；在複雜地形或粗糙度高的情形，則少有研究探討。

在此一研究中使用第四章所介紹之 SLAB 和 DEGADIS 模式，配合風洞實驗的條件，進行數值模擬，並將計算結果與實驗數據互相比較，以了解在粗糙度較大時模式之適用性。

數學模式所須之輸入資料與風洞實驗條件相同，包括：

——污染源視為連續排放之蒸發池(evaporation pool)，其直徑為 20.5m，排放速率由實驗條件求出；

——在風洞實驗中，污染物之儲存溫度、排放溫度皆與大氣溫度相同，氣體的分子量則依密度比求出，在數學模式中也如此假設；

——風洞時驗中利用風速剖面求出地面粗糙度約為 0.3m，此值也用於數學模式；

——大氣狀況為中性穩定。

這兩個模式輸出之資料互異，為了方便比較，我們將各模式所計算出之煙流中心線地面濃度取出，和風洞實驗結果加以比較。

圖 5.4.1 為平坦地形，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.3m，四種不同密度比( $\rho_s/\rho_a=1.0, 1.2, 1.35, 1.53$ )，風洞實驗結果和模式模擬值之比較。此一圖上縱軸為下風距離(m)，橫軸為污染物煙流中心線的地面濃度(以莫耳分率表示)，圓點為實驗值，實線為 SLAB 模式之計算結果，虛線為 DEGADIS 模式之計算結果。

由此一圖上可以看出，在無密度差異的情況下( $\rho_s/\rho_a=1$ )時，三者之結果最為接近，風洞實驗值介於兩個模式計算值之間，然而當密度比變大時，風洞實驗結果和模式計算值產生較大之差異，在風洞實驗中，煙流中心線地面濃度較模擬值為高，此可能因兩者亂流場有所不同，在風洞實驗中逼近流場之風速剖面顯示地面粗糙度為 0.3m，但在擴散試驗段，並未佈置粗糙元素，因此地面粗糙度會降低，亂流動能逐漸消散，使得擴散程度較小，在所求出之亂流動能剖面顯示地面粗糙度約為 0.1m。

此一研究中為了解此一觀點是否正確，因此，假設擴散區的地面粗糙度可以用 0.1m 表示，重新進行模式模擬，所得結果顯示於圖 5.4.2 中。

圖 5.4.2 和圖 5.4.1 類似，只是模式模擬時地面粗糙度變小，由圖上可以看出如假設地面粗糙度為 0.1m 時，模式計算值和風洞實驗結果在不同的密度比，均極為接近。在靠近排放源處 SLAB 模式計算之中心線地面濃度較低，而 DEGADIS 模式則偏高，實驗結果大致落於兩者之間，在遠處下風地區，則三者相當接近。

由此圖可以看出地表粗糙度及其所造成的機械亂流對重質氣體擴散有很大的影響，此一實驗所得之結果和兩個模式結果比較，顯示在平坦地形地區模式計算值相當合理。

為了解模式模擬時如輸入不正確的粗糙度，對計算結果有何影響，我們假設地表粗糙度為 0.01m(鄉村地區)，重新進行模式模擬，模式計算結果和實驗值之比較，如圖 5.4.3 所示，如前所述，風洞實驗時地面粗糙度約為 0.1-0.3m，如果模式輸入的粗糙度過低，將造成模式所求出之地面中心濃度較實驗值高出甚多，地面粗糙度較小時，亂流動能也小，因此污染物不易快速擴散，地面濃度會較高。

圖 5.4.4 至圖 5.4.6 為粗糙度為 0.3m、0.1m 和 0.01m 時，平坦地形地區不同密度比的實驗和計算結果之比較，由圖上可以看出一些有趣的現象：

當密度比為 1.2、1.35 和 1.53 時，其排放源之 Froude 數皆為 21，因此，在模式計算結果中，這三條線幾乎重疊在一起，但密度比為 1 時，模式模擬之濃度分佈與其他三條線並不一致，有相當大的差異，然而在風洞實驗中，所有四條線皆非常接近，此與一般認知不太一樣，其原因有待進一步的探討。

當  $\rho_s / \rho_a = 1.0$  時，其地面中心線之濃度有時較重質氣體擴散後之地面中心線之濃度大，有時較重質氣體擴散小，視地面粗糙度而定，當地面粗糙度為 0.3m 時，密度差為零時，地面中心濃度較高，當地面粗糙度為 0.1 時，地面中心濃度仍然較高，但和重質氣體之濃度差異已縮小，當地面粗糙度為 0.01m 時，重質氣體擴散所產生之地面中心濃度相對較大，此種現象，在過去並未見有人探討。

分析產生此一現象之原因可能與亂流有關，重質氣體在離開排放源後，受重力作用，往外流動，產生較大但較薄的二次污染源，如果外界

亂流強度較大，容易在邊緣產生捲增效應(entrainment)，使中心最大濃度較低。反之，如外界亂流強度較小，則重質氣體雖形成較大之二次污染源，但因缺乏足夠的混合，所以地面濃度偏高，此一現象十分有趣，值得進行深入的分析。

## 5.5 有障礙物存在時，風洞實驗與模式模擬之比較

SLAB 模式和 DEGADIS 模式均無法考慮複雜地形對擴散的影響，因此，可能不適合在有障礙物的情況之下使用，本研究之結果顯示確實如此。

圖 5.5.1 至圖 5.5.6 為六組風洞實驗和模式模擬結果之比較。這些圖中，風洞實驗有障礙物(如方塊或山脊時)存在，然而 SLAB 和 DEGADIS 模式並無法考慮地形和地物的變化，所以模式模擬和平坦地形採相同方法。

由這些圖上可以看出有障礙物時，會造成強烈的亂流，因此，污染物獲得較大的稀釋，地面濃度會較小，而 SLAB 和 DEGADIS 模式則無法考慮此種現象，因此，其結果偏高甚多。

圖 5.5.7 為不同障礙物對地面中心濃度之影響，由圖上可以看出平坦地形，地面中心濃度最高，其次為有方塊之情況，最小則為有二維山脊之情形，與亂流強度有密切關係。

SLAB 和 DEGADIS 模式無法考慮地形的影響，風洞實驗也顯示不同的障礙物其影響程度不一，因此很難修改像 SLAB 或 DEGADIS 這種簡單的模式讓其適用於複雜地形地區。這種簡單的模式雖然無法準確地求出複雜地形地區的擴散，但其計算結果較為保守，可供作初步的評估；如果須要準確的模擬可能須要利用三維數值模式，此有待未來進一步的研究。

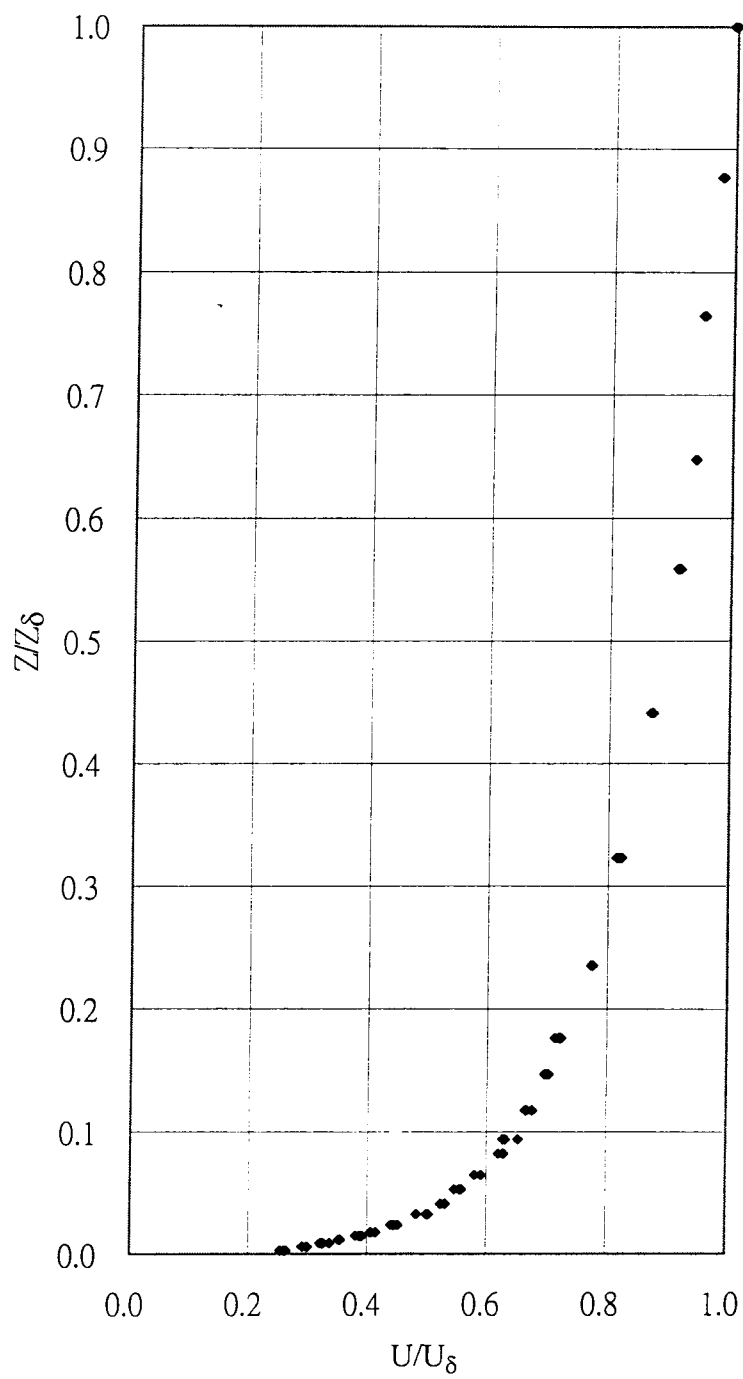


圖5.1.1 平均風速剖面圖

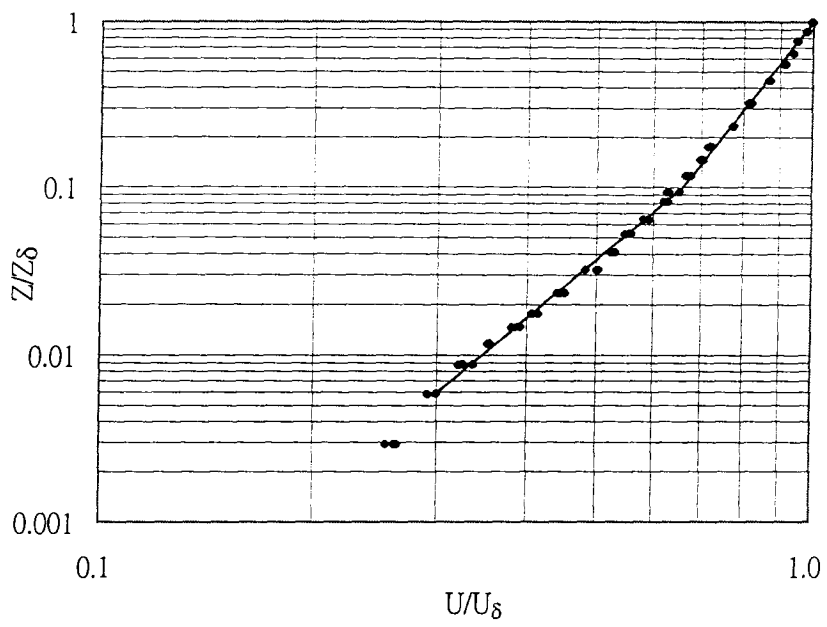


圖5.1.2 平均風速剖面(指數律方式)

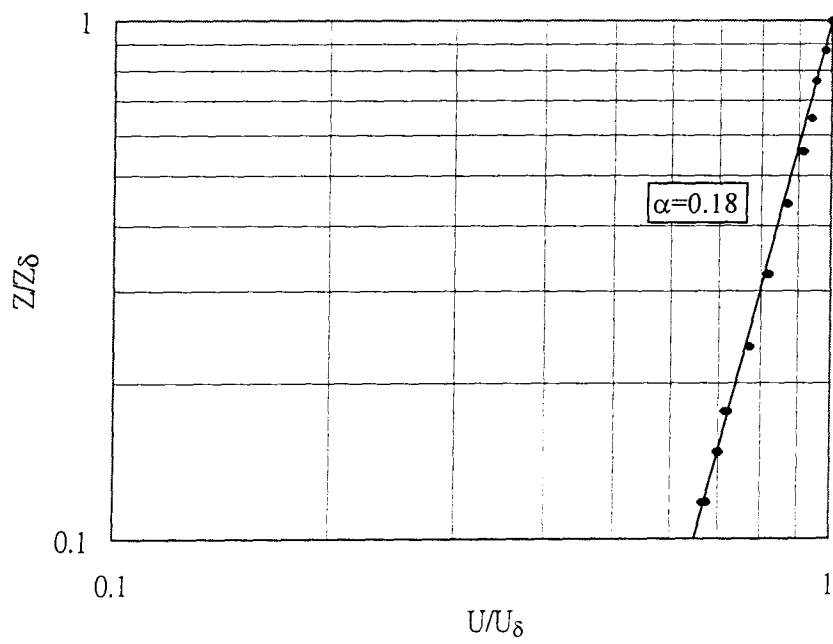


圖5.1.3 平均風速剖面(指數律方式, 90% of  $\delta$ )

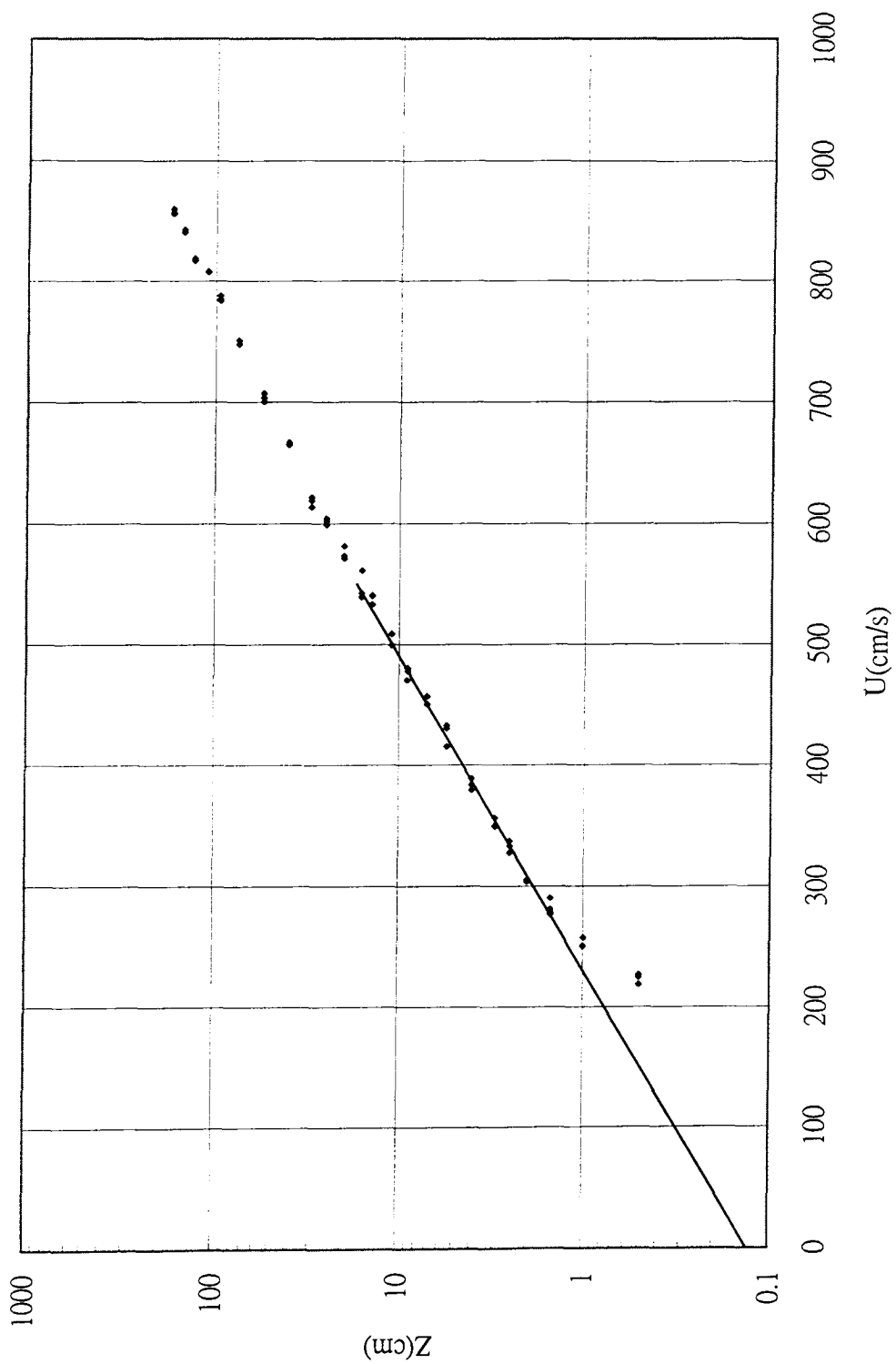


圖5.1.4 平均風速剖面(對數律方式)

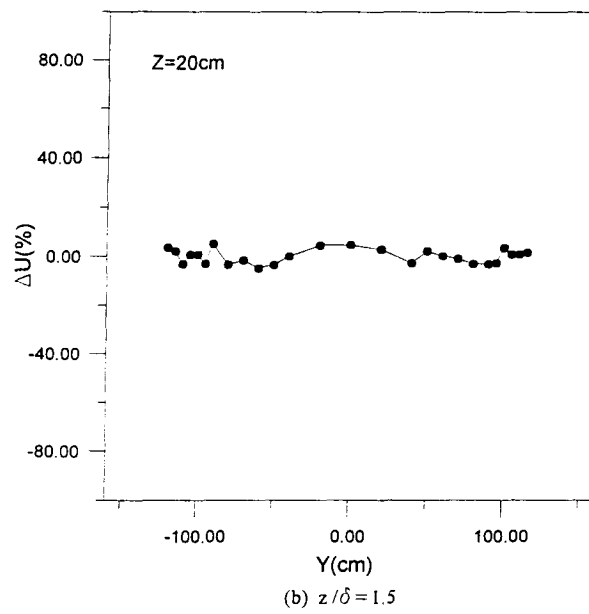
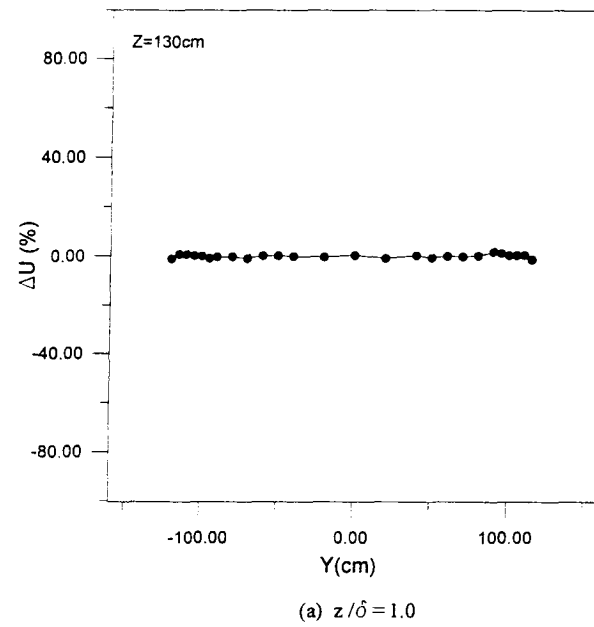


圖 5.1.5 水平方向平均風速剖面

$$(\Delta U = (U - \bar{U}) / \bar{U} \quad (\%))$$



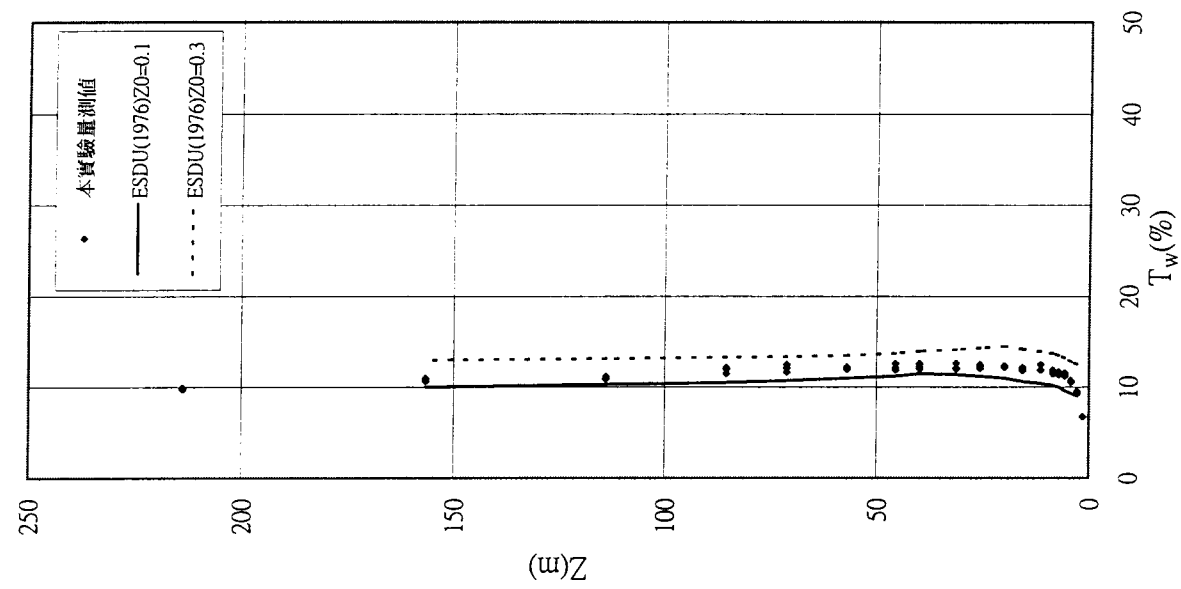


圖5.1.6 縱向紊流強度剖面圖

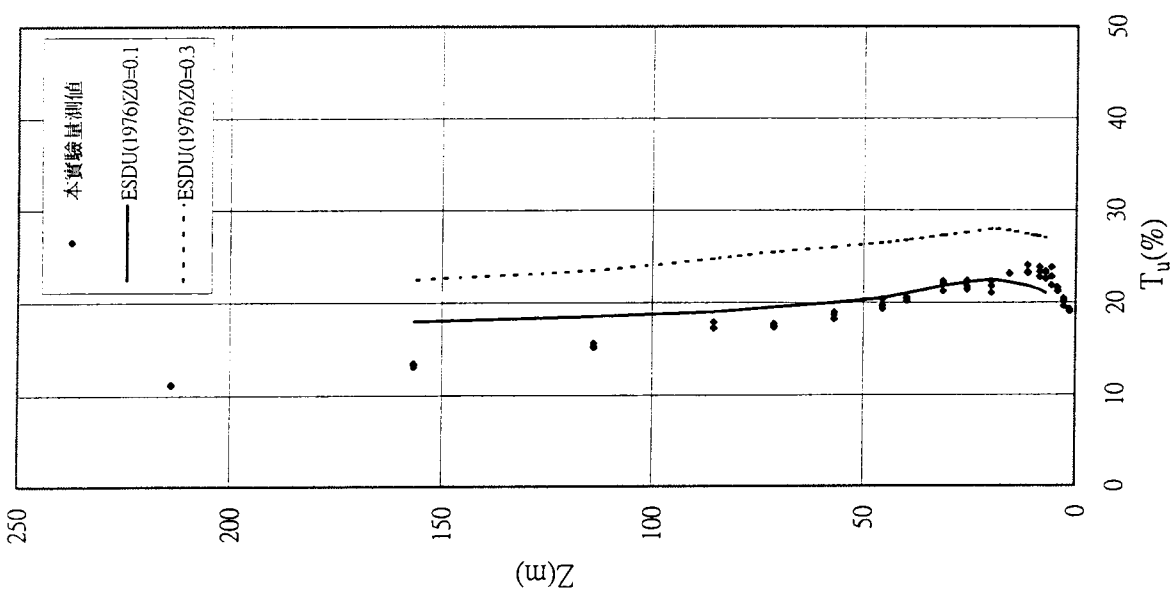


圖5.1.7 垂直紊流強度剖面圖

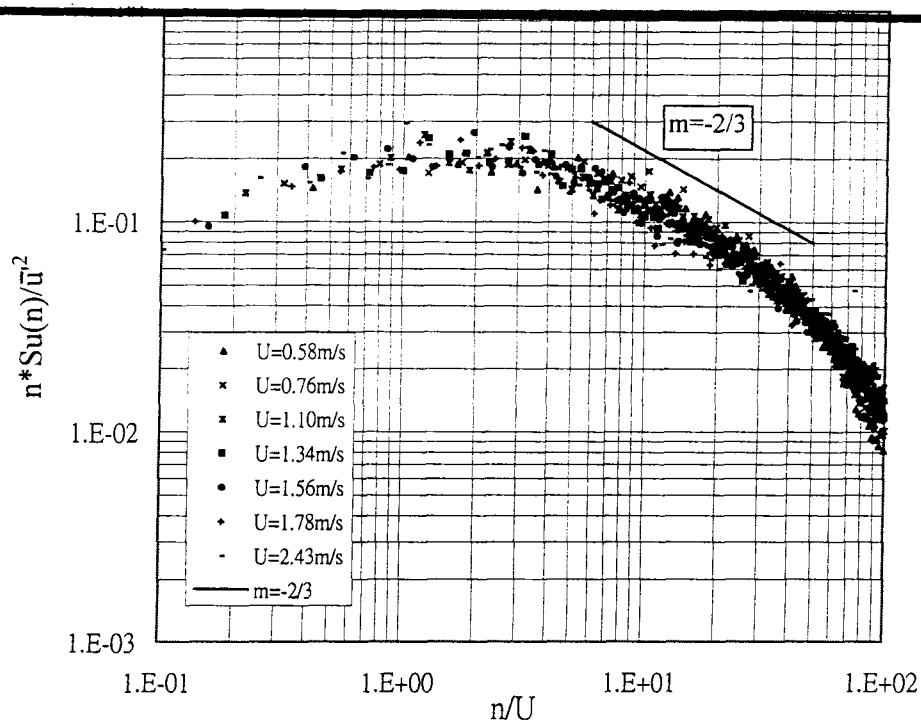


圖5.1.8 縱向擾動風速頻譜(高度2.5cm,  $U > 0.58 \text{ m/s}$ )

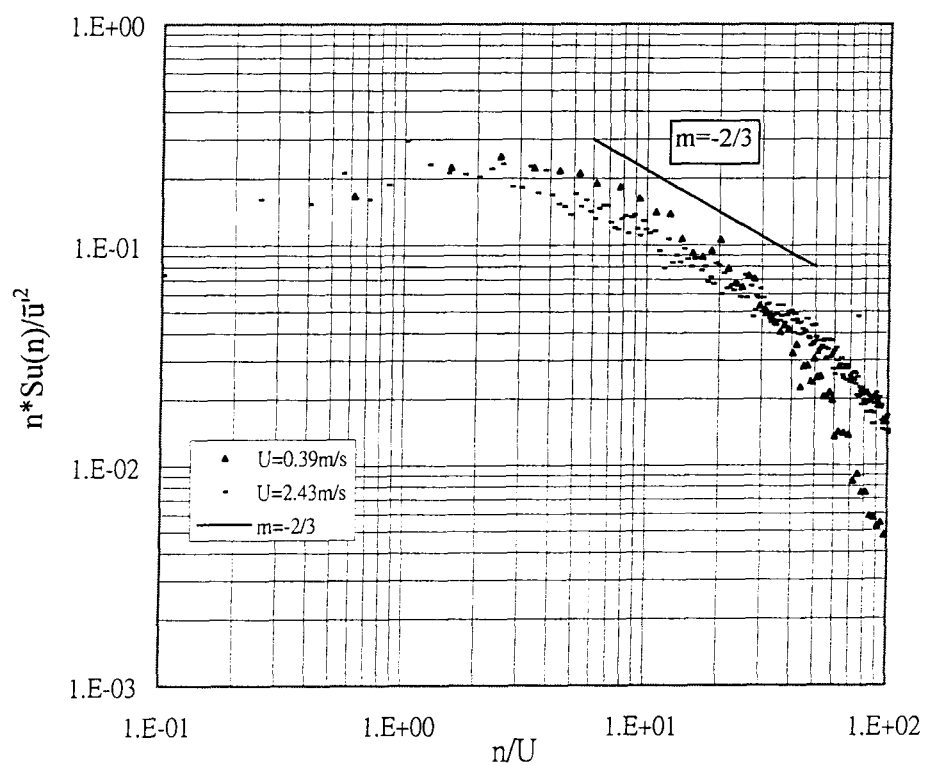


圖5.1.9 縱向擾動風速頻譜(高度2.5cm,  $U < 0.58 \text{ m/s}$ )

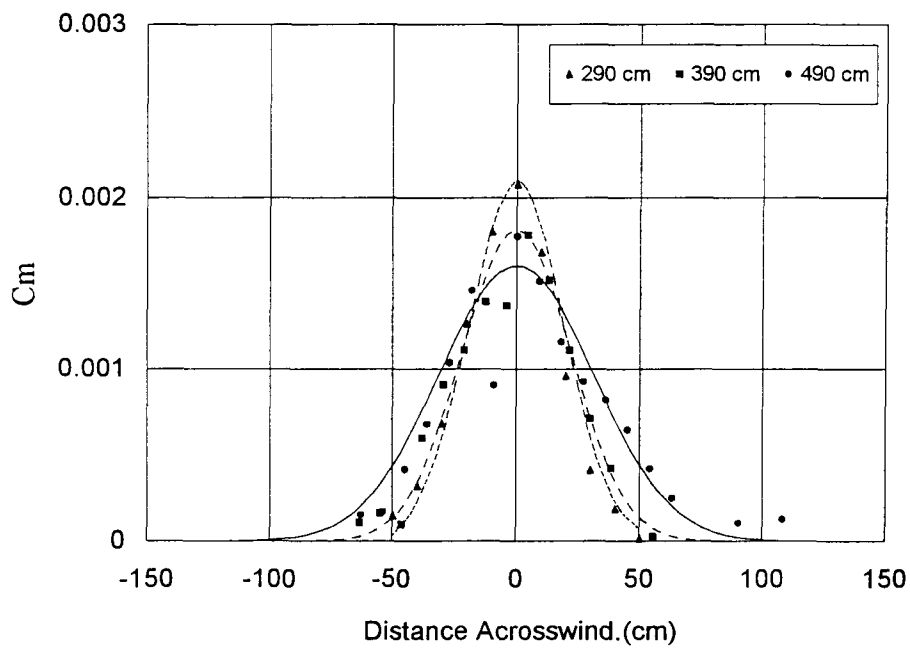


圖 5.1.10 橫向擴散濃度分布剖面圖

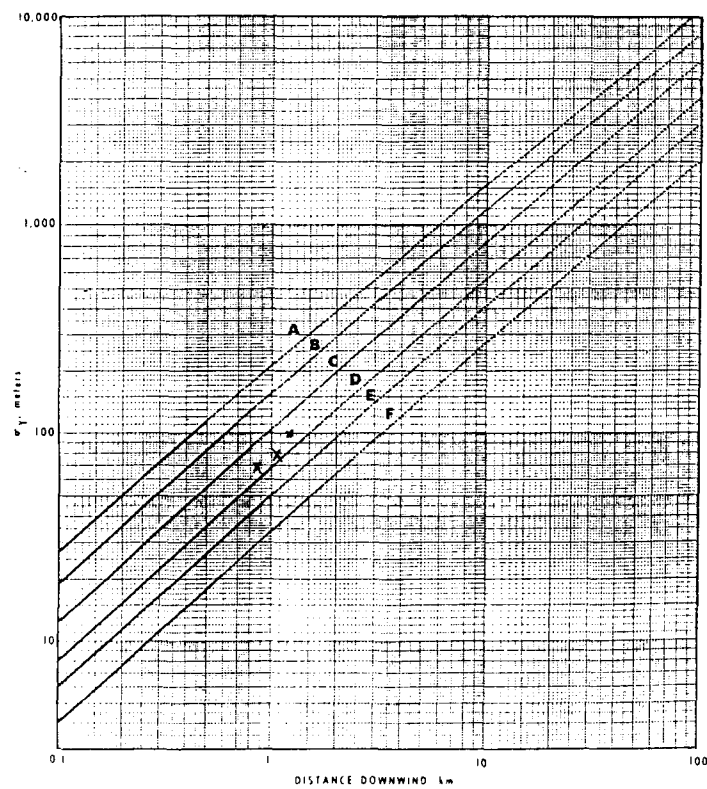


圖 5.1.11 估計風洞擴散係數( $\sigma_y$ )與標準 Pasquill Gifford 值之比較

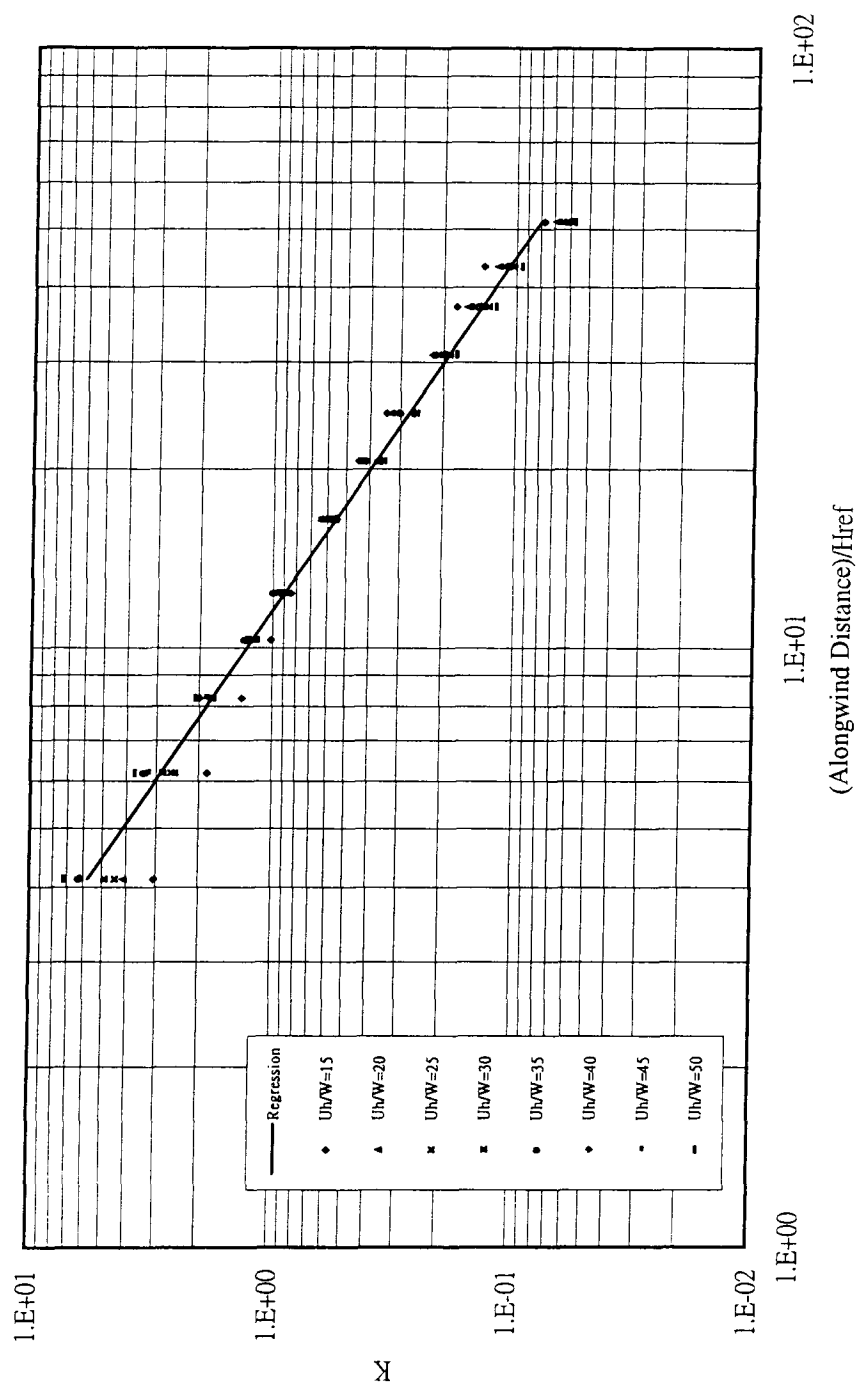


圖5.2.1 被動煙流中線上之無因次化濃度衰減回歸結果

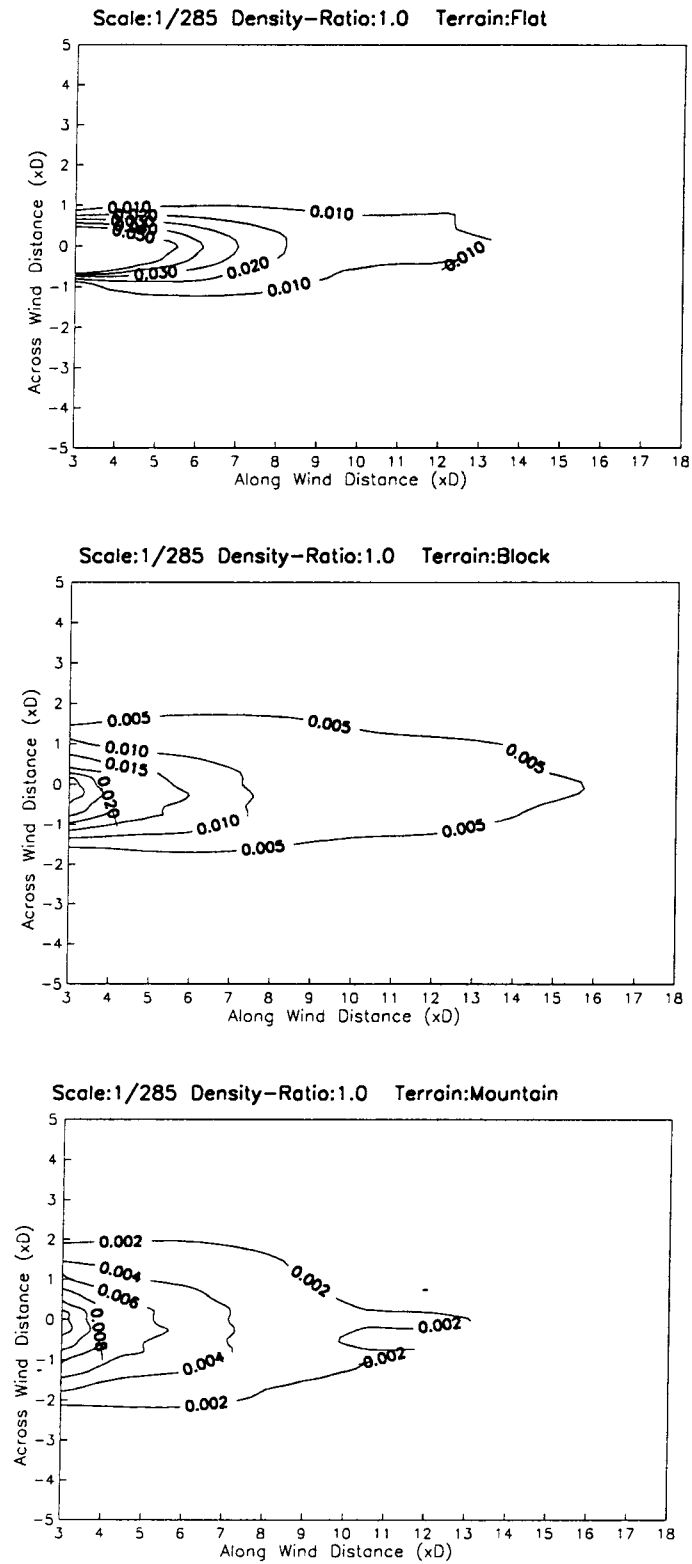


圖 5.3.1 縮尺 (1/285)、密度比 (1.0) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

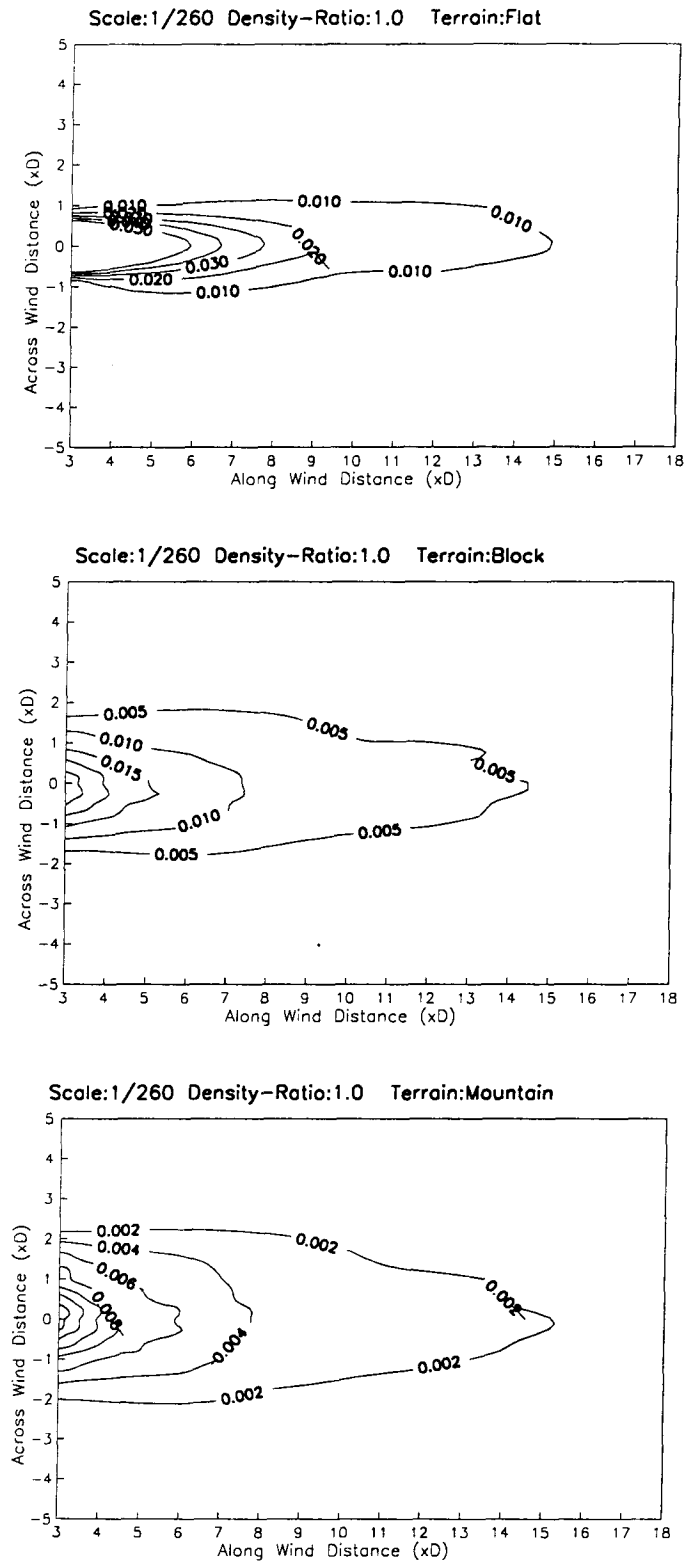


圖 5.3.2 縮尺 (1/260)、密度比 (1.0) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

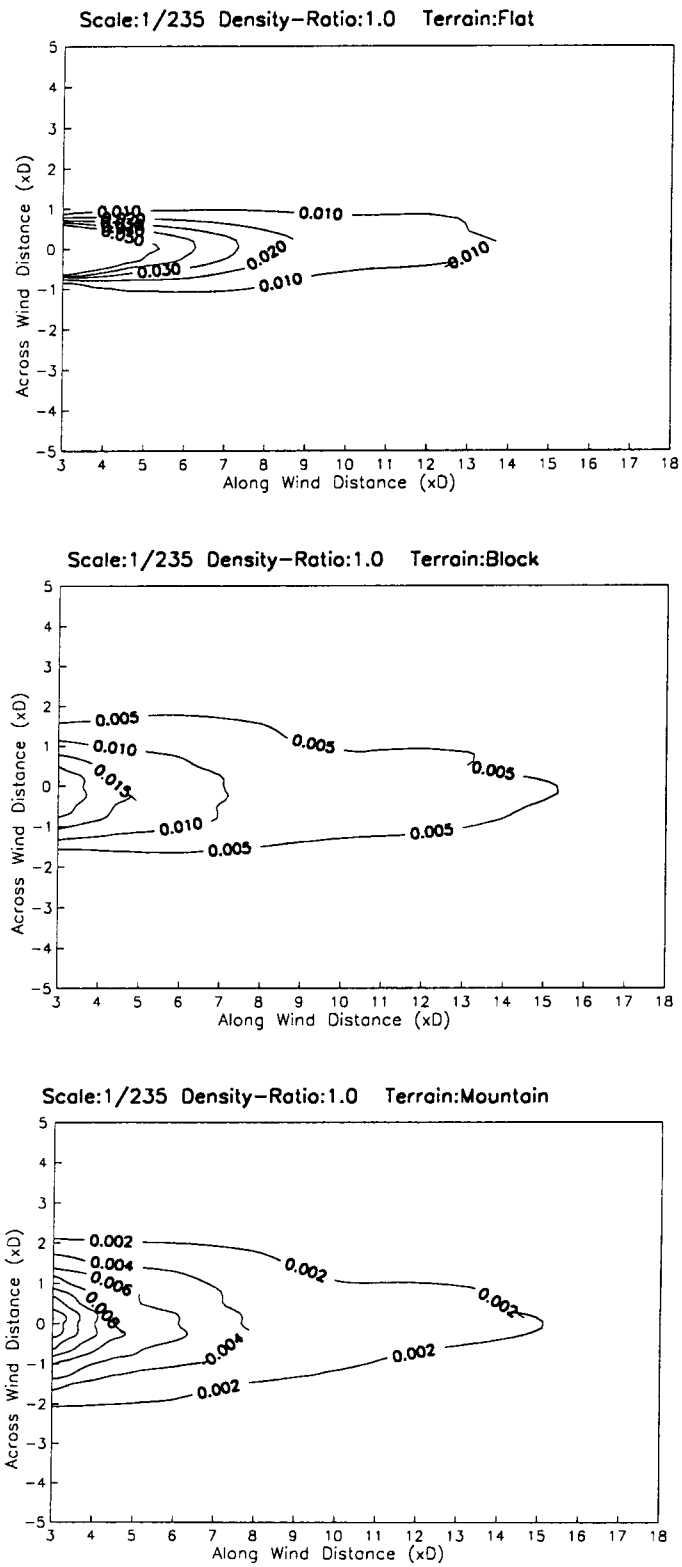


圖 5.3.3 縮尺 (1/235)、密度比 (1.0) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

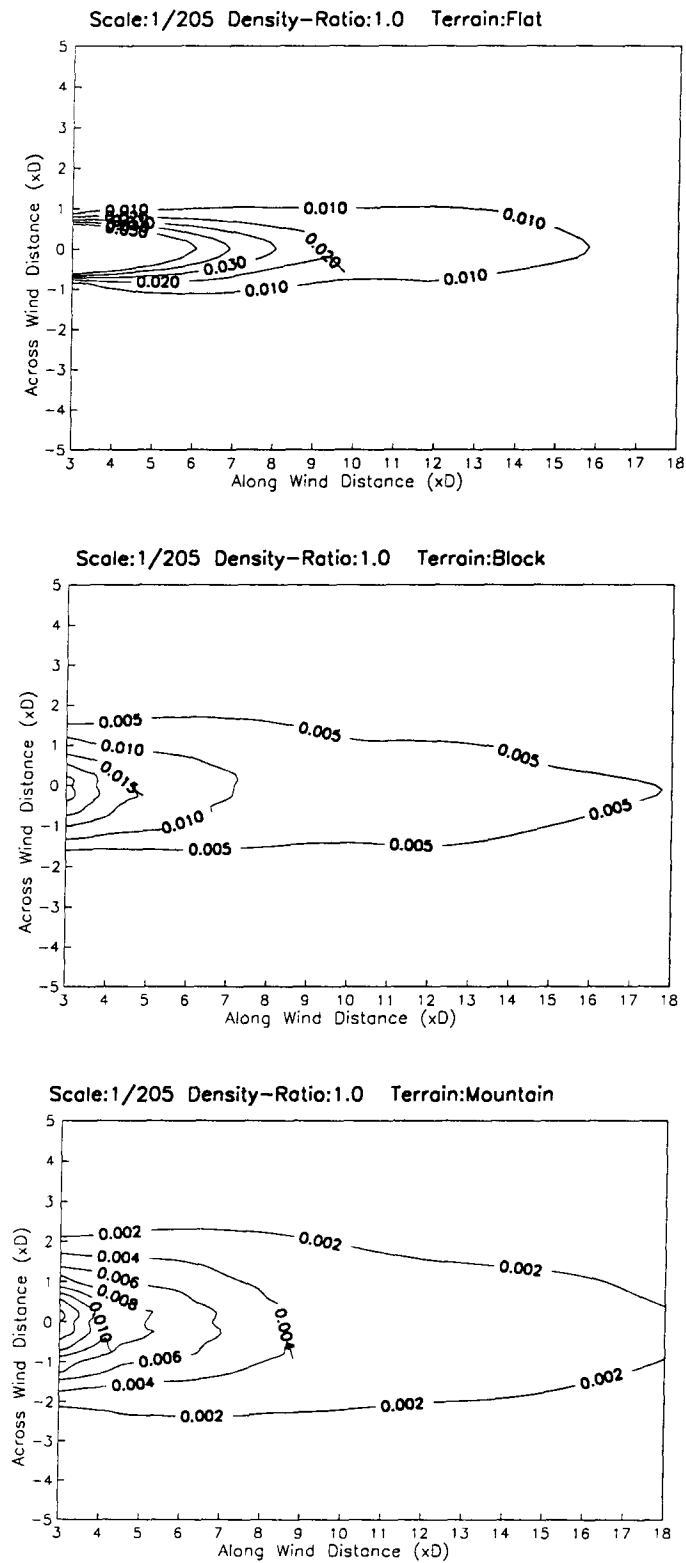


圖 5.3.4 縮尺 (1/205)、密度比 (1.0) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈



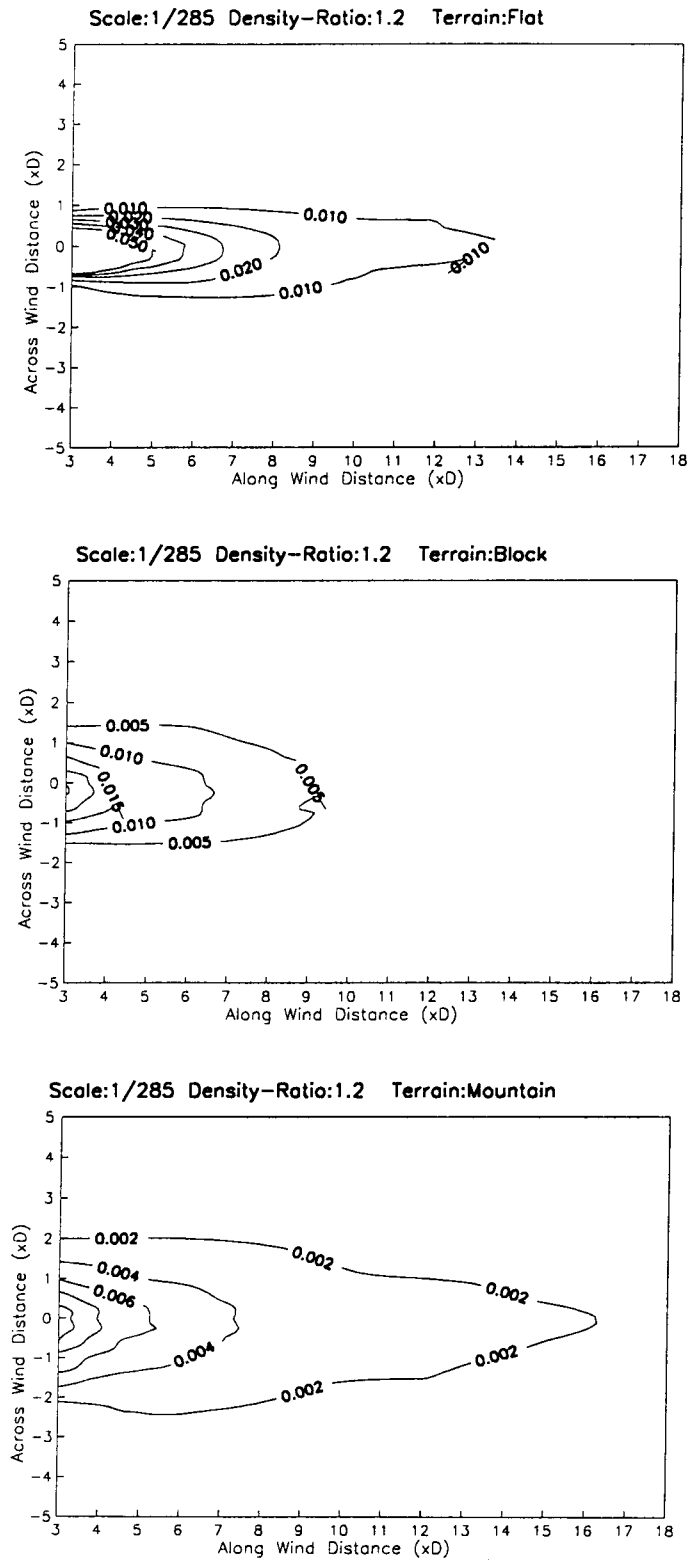


圖 5.3.5 縮尺 (1/285)、密度比 (1.2) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

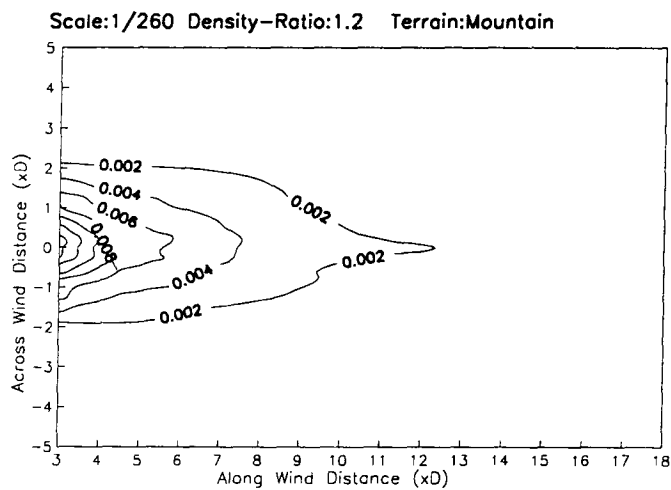
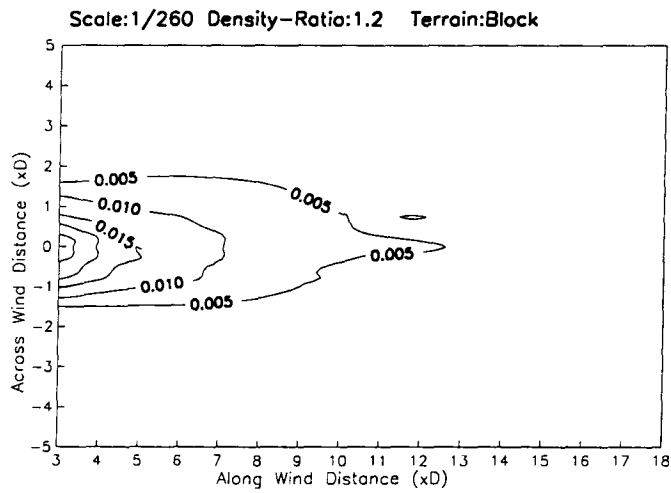
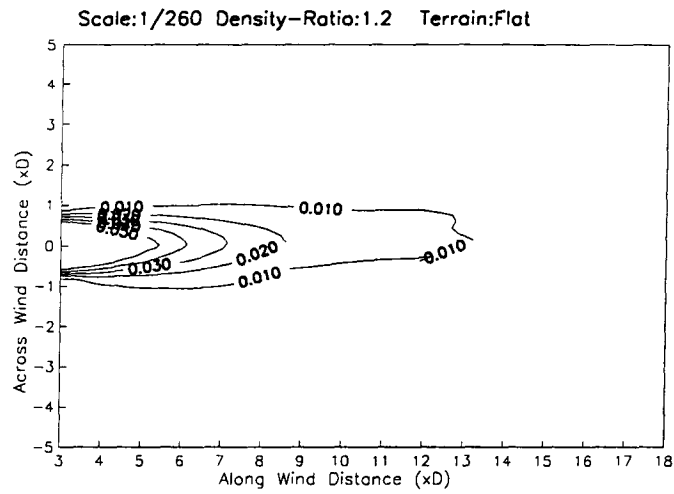


圖 5.3.6 縮尺 (1/260)、密度比 (1.2) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

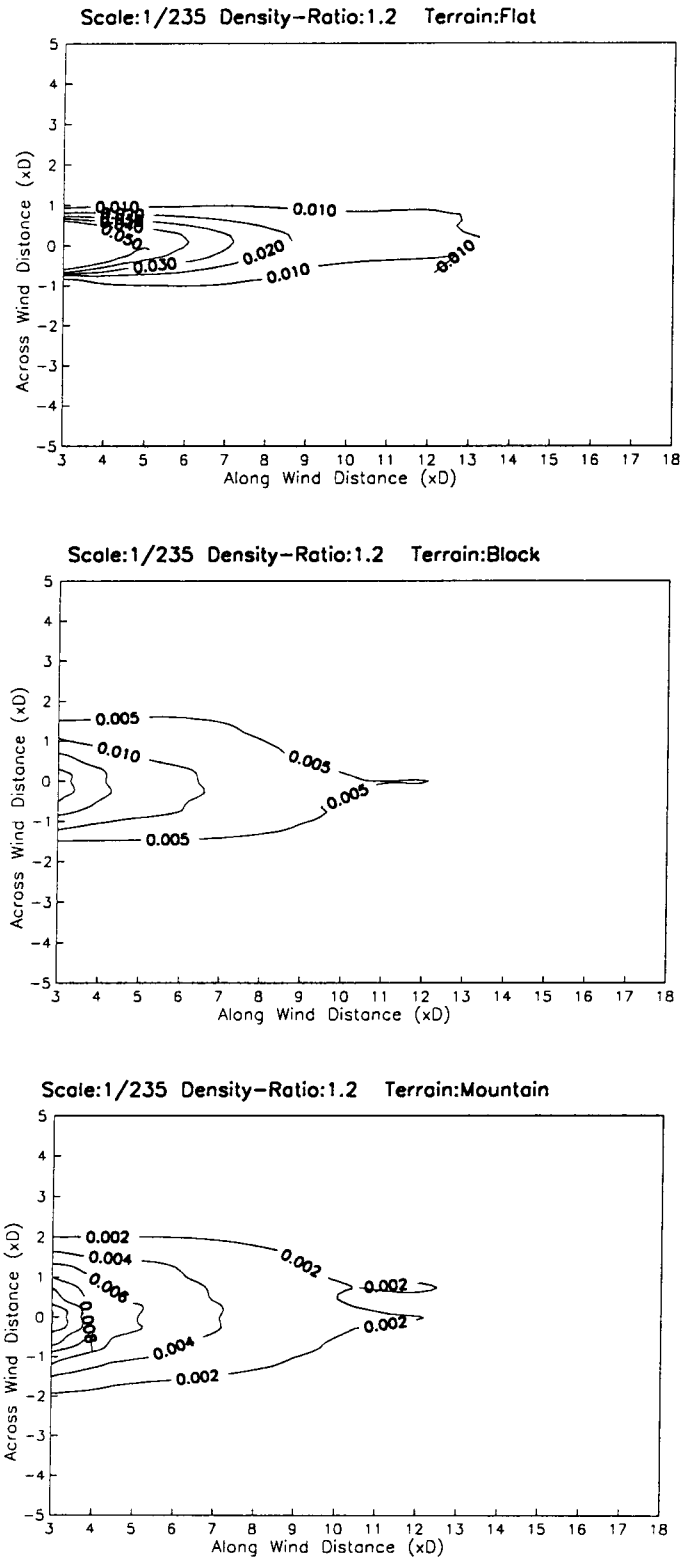


圖 5.3.7 縮尺 (1/235)、密度比 (1.2) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

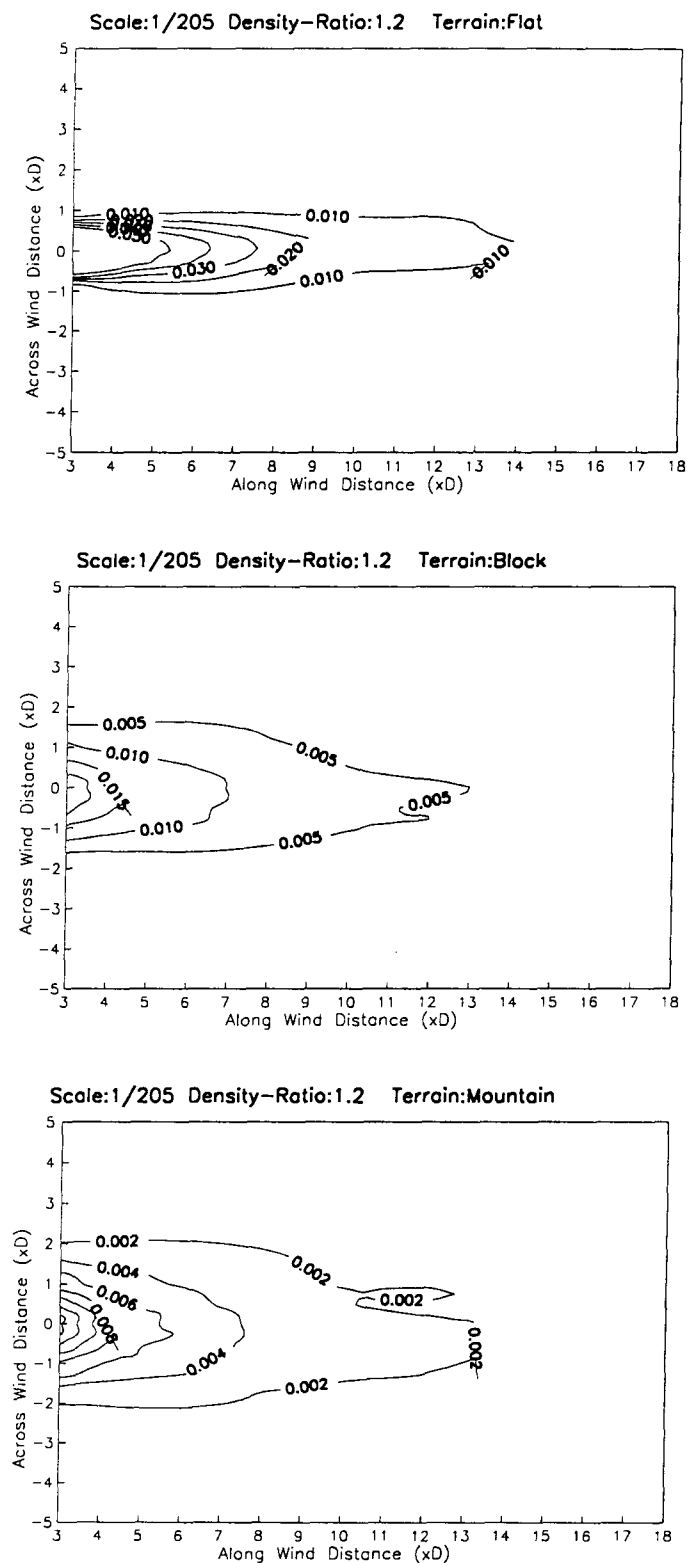


圖 5.3.8 縮尺 (1/205)、密度比 (1.2) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

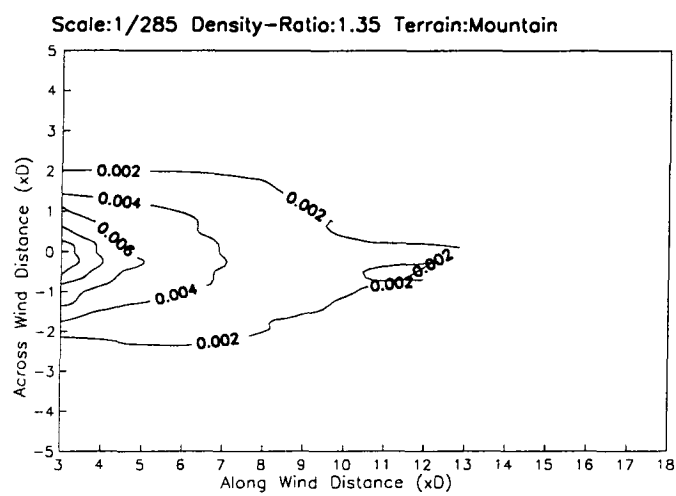
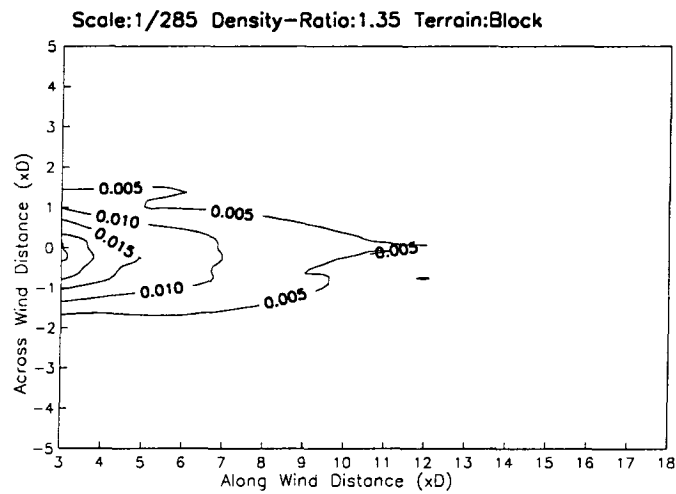
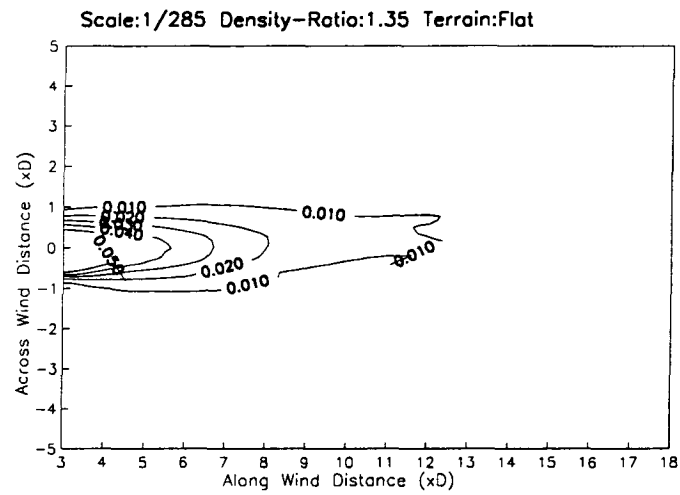


圖 5.3.9 縮尺 (1/285)、密度比 (1.35) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

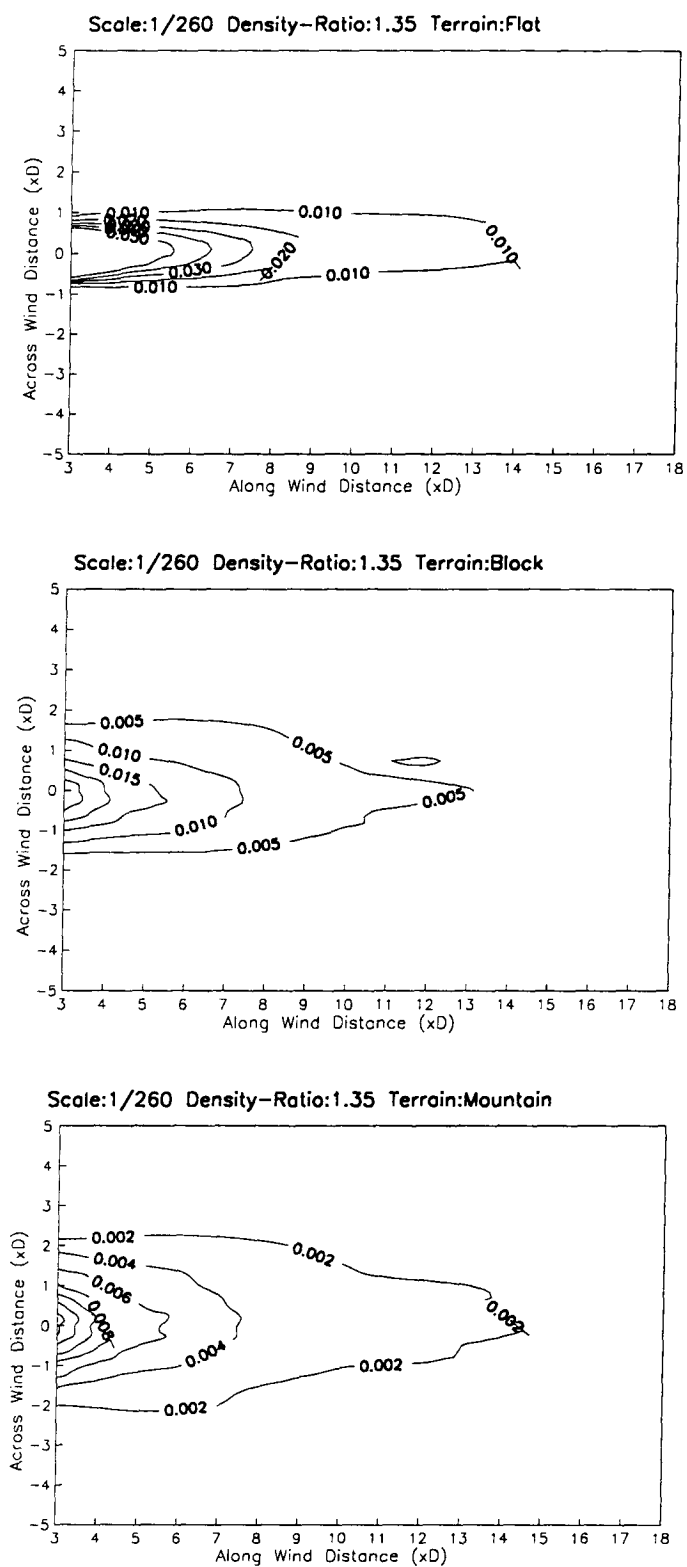


圖 5.3.10 縮尺 (1/260)、密度比 (1.35) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

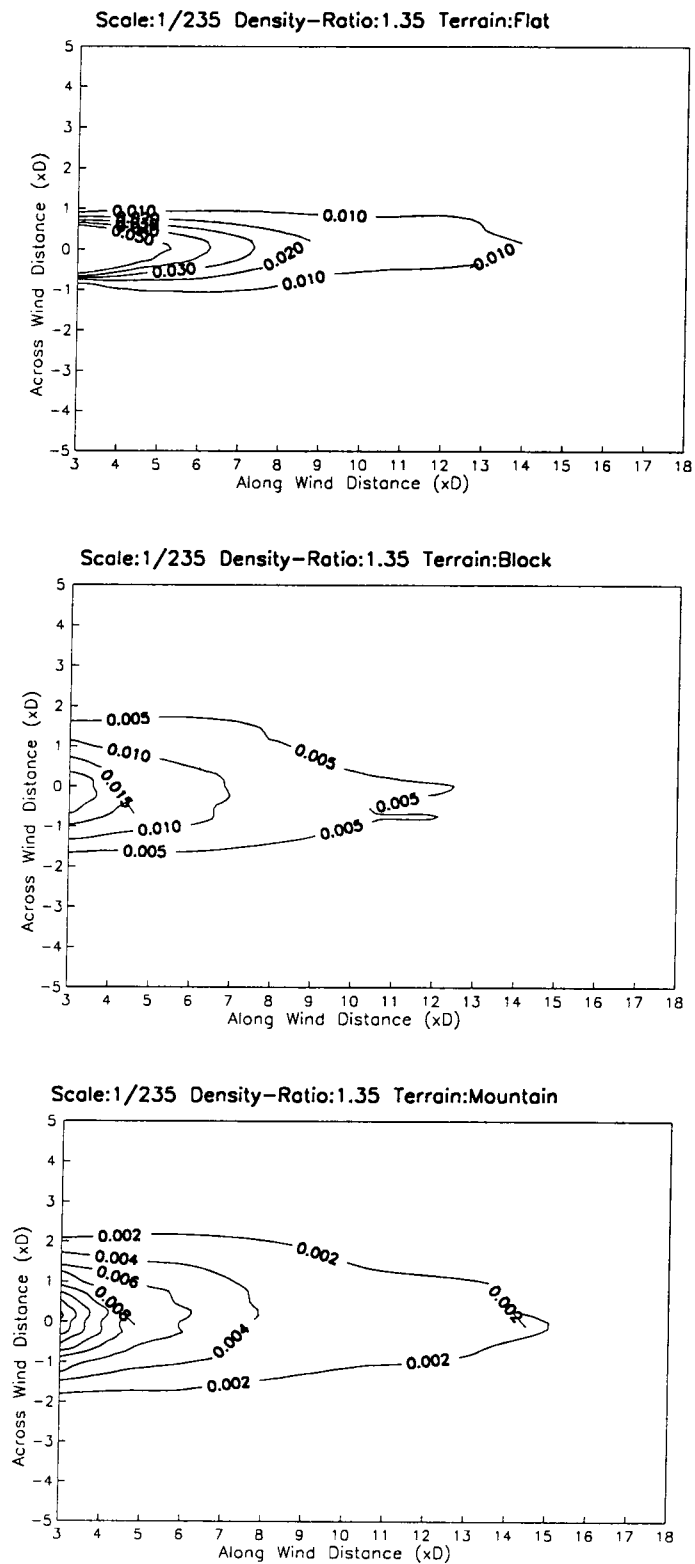


圖 5.3.11 縮尺 (1/235)、密度比 (1.35) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

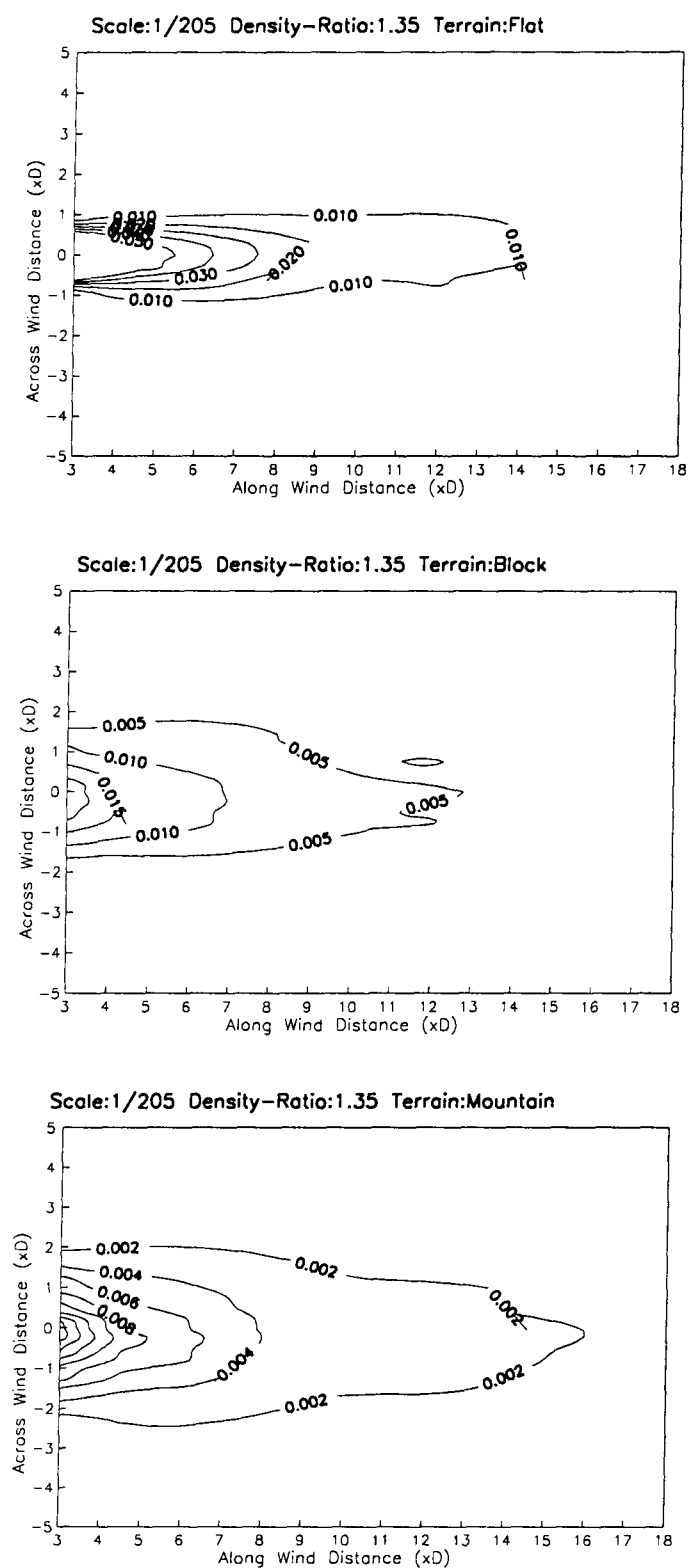


圖 5.3.12 縮尺 (1/205)、密度比 (1.35) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈



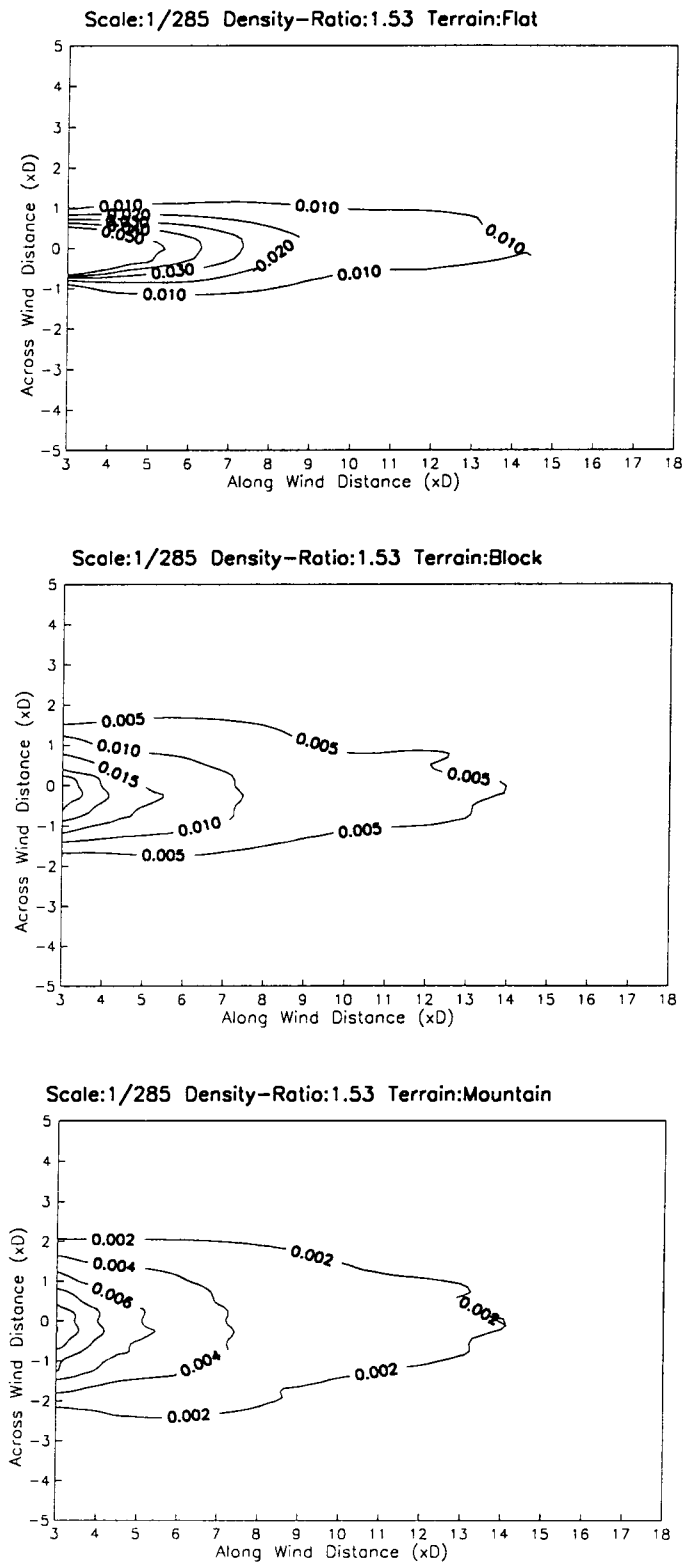


圖 5.3.13 縮尺 (1/285)、密度比 (1.53) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

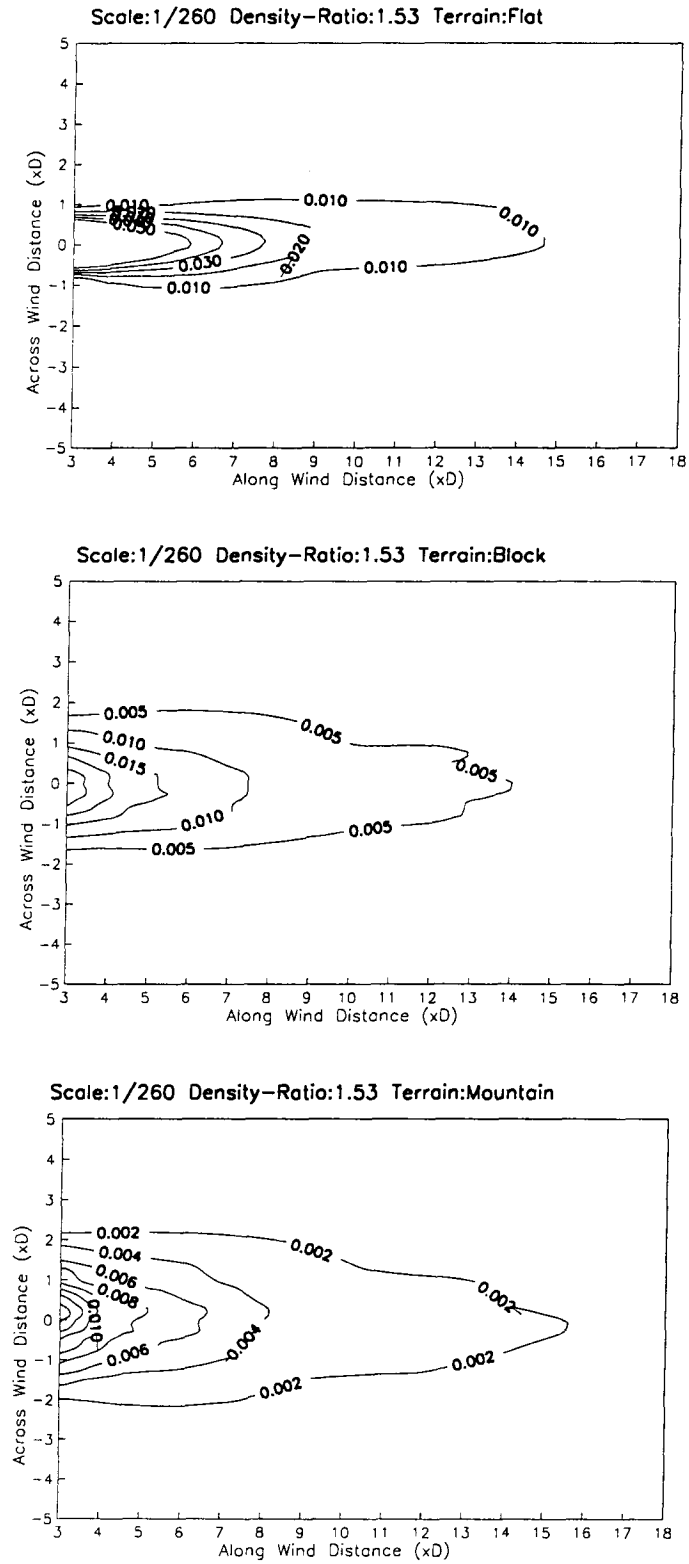


圖 5.3.14 縮尺 (1/260)、密度比 (1.53) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

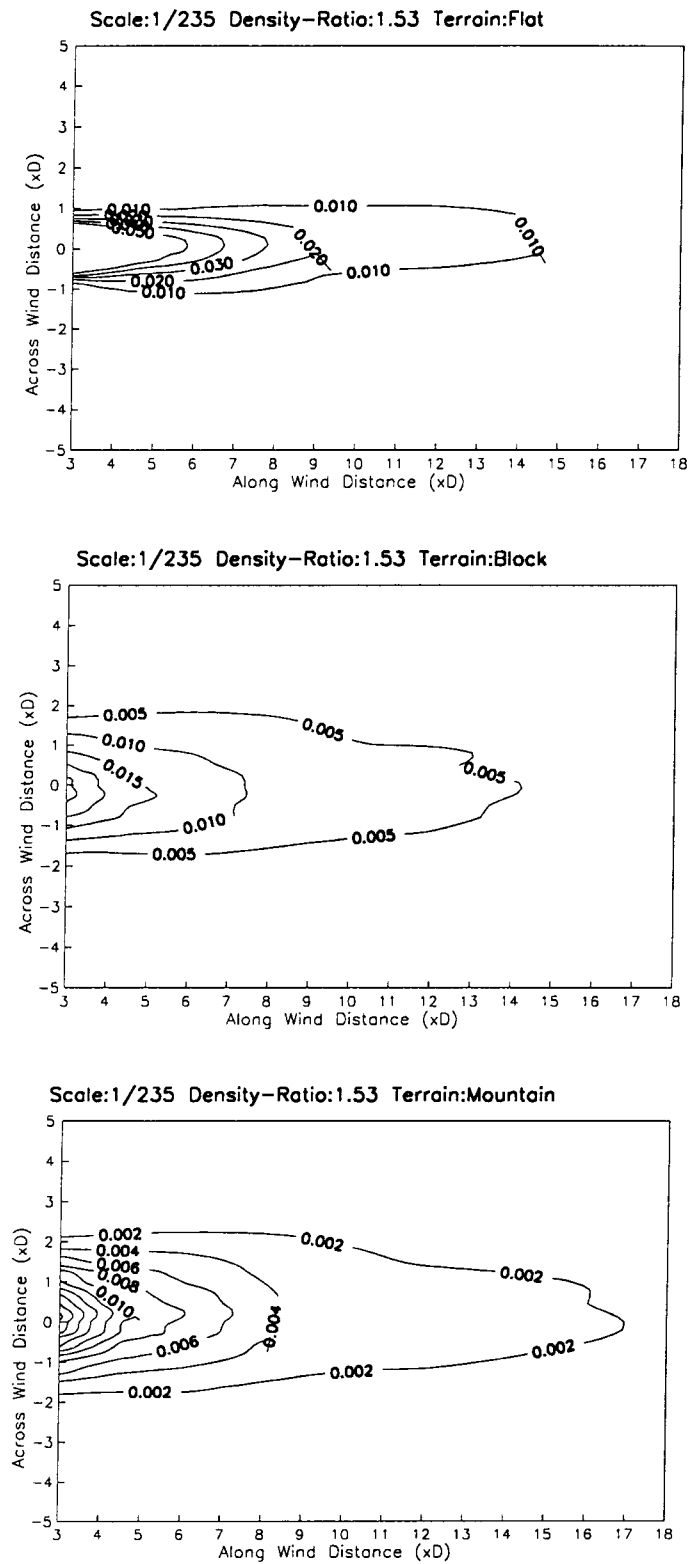


圖 5.3.15 縮尺 (1/235)、密度比 (1.53) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

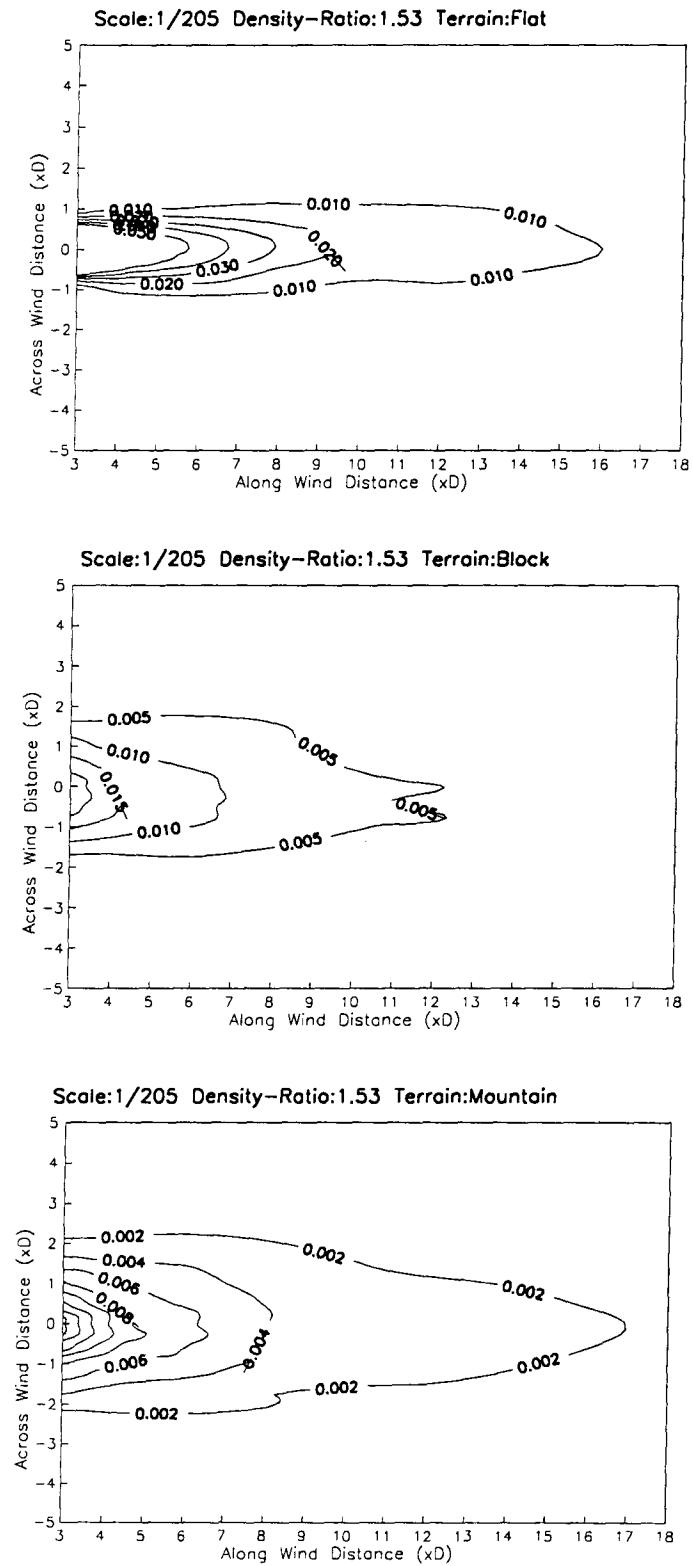


圖 5.3.16 縮尺 (1/205)、密度比 (1.53) 固定，不同地形地物之地表濃度係數分佈

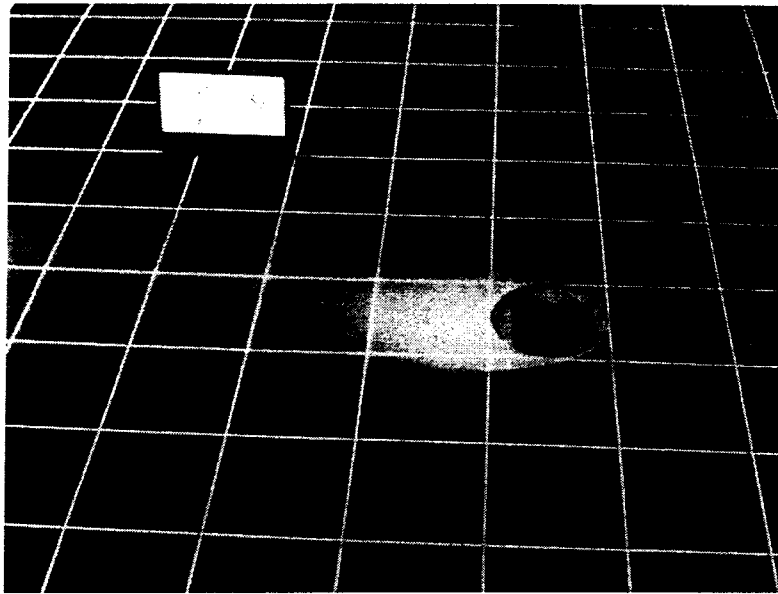


圖 5.3.17 平坦地形之煙流可視化(上視圖)

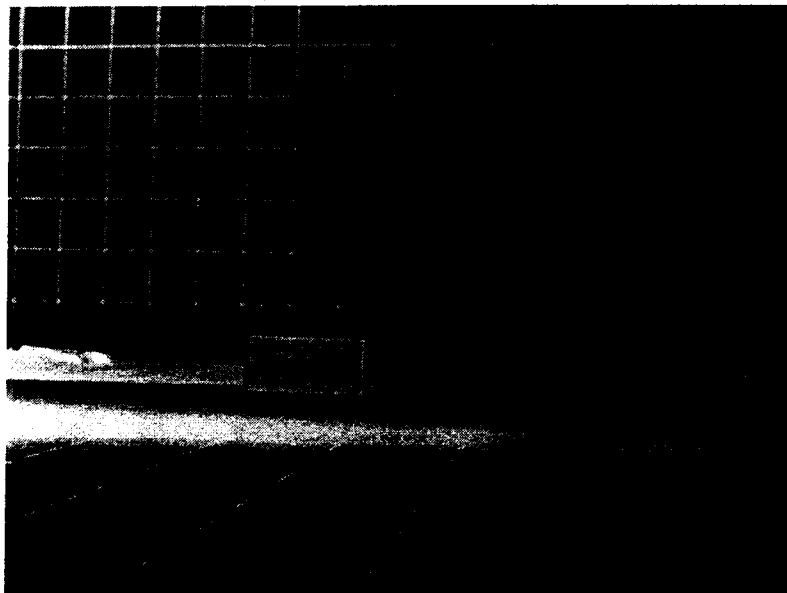


圖 5.3.18 平坦地形之煙流可視化(側視圖)

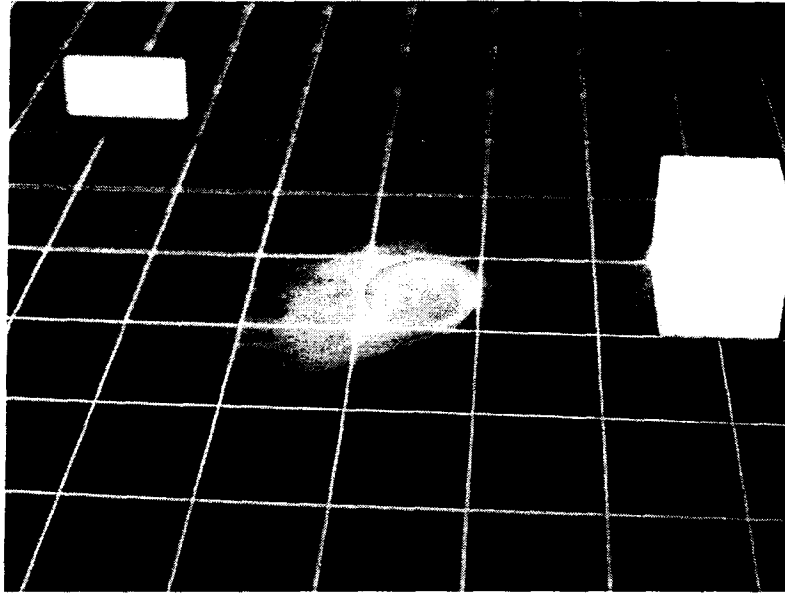


圖 5.3.19 二維方塊之煙流可視化(上視圖)

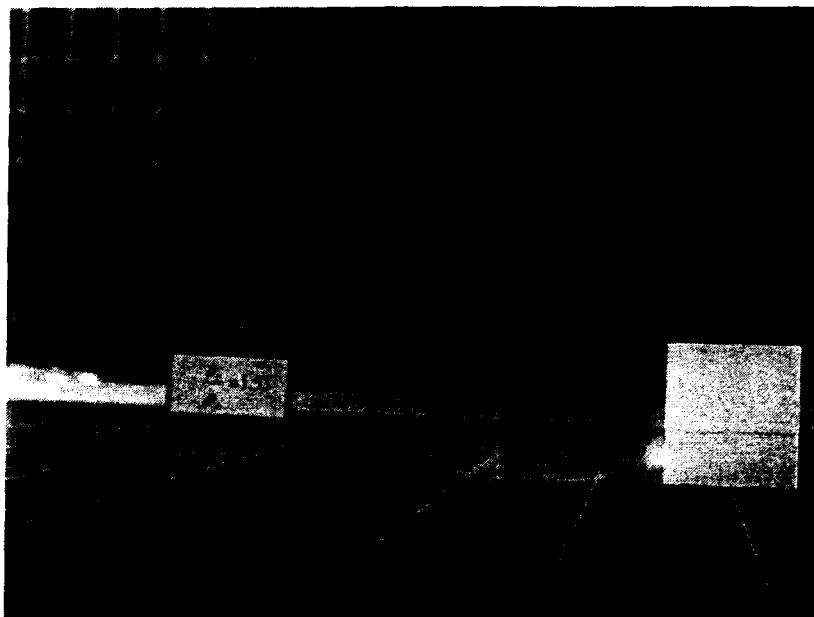


圖 5.3.20 二維方塊之煙流可視化(側視圖)

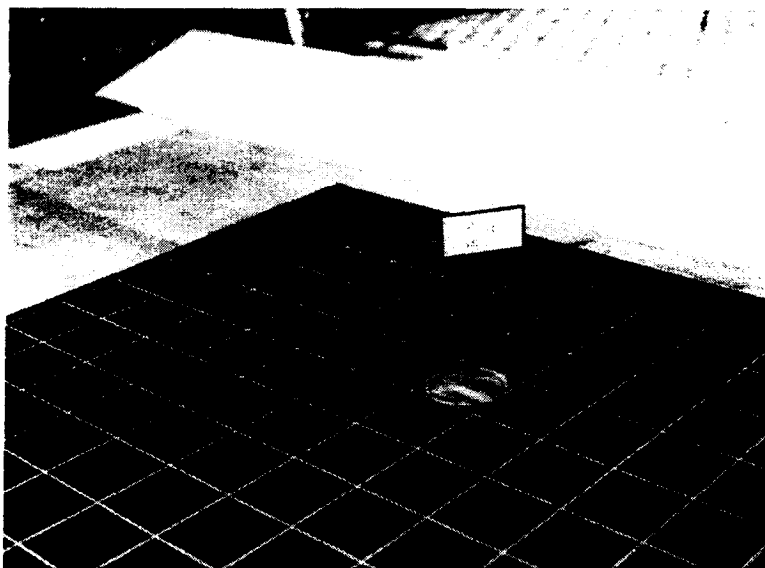


圖 5.3.21 三維山脊之煙流可視化(上視圖)

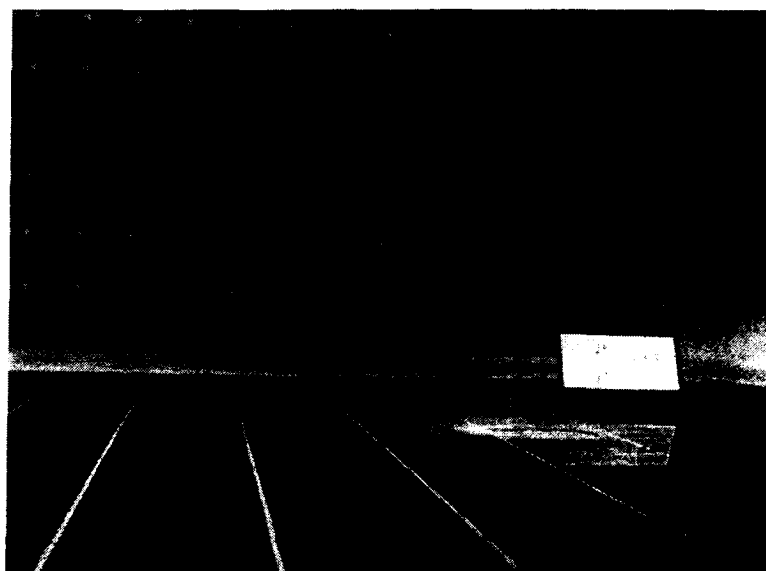


圖 5.3.22 三維山脊之煙流可視化(側視圖)

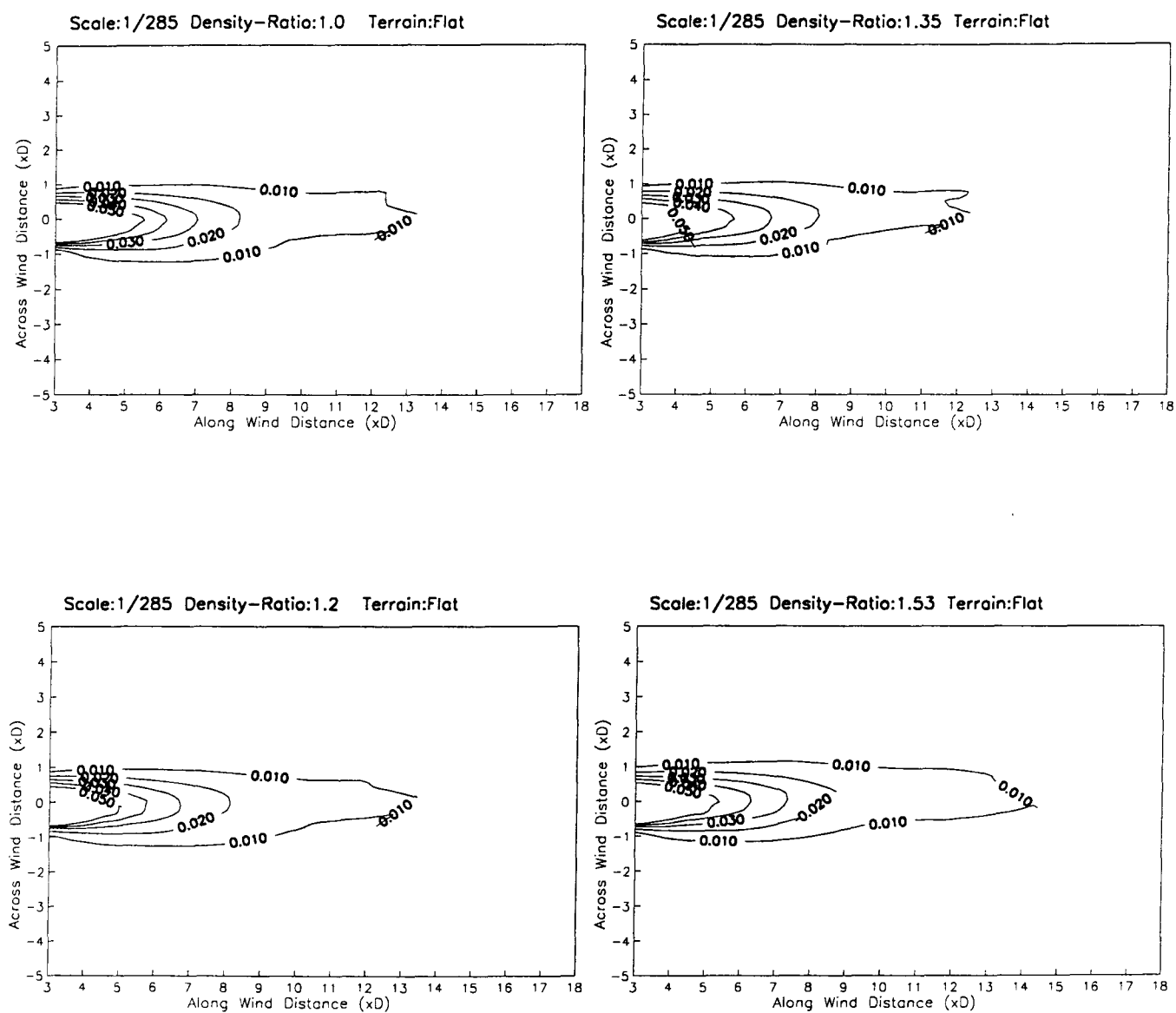


圖 5.3.23 縮尺 (1/285)、地形地物 (flat) 固定，不同密度比之地表濃度係數分佈



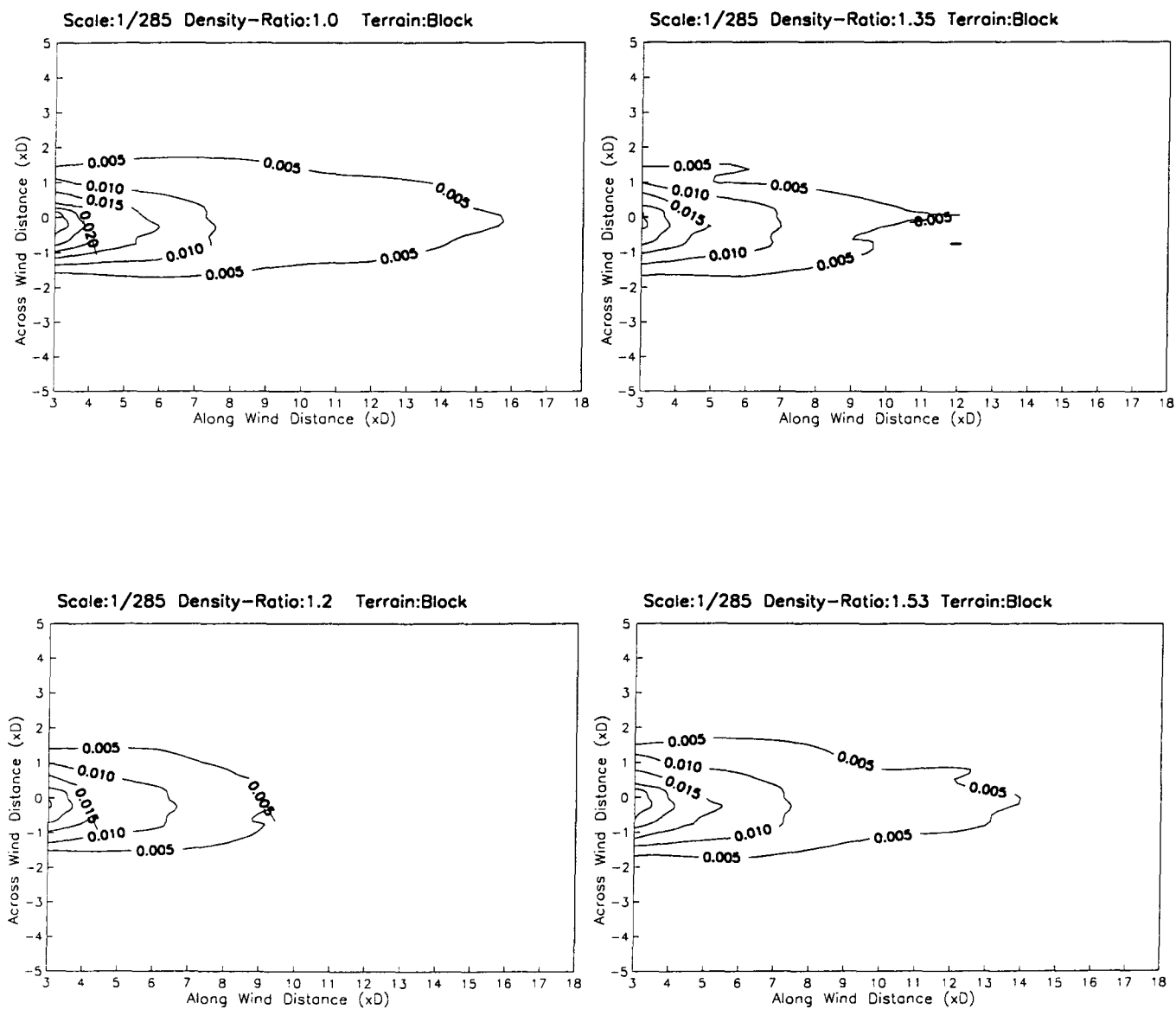


圖 5.3.24 縮尺 (1/285)、地形地物 (block) 固定，不同密度比之地表濃度係數分佈

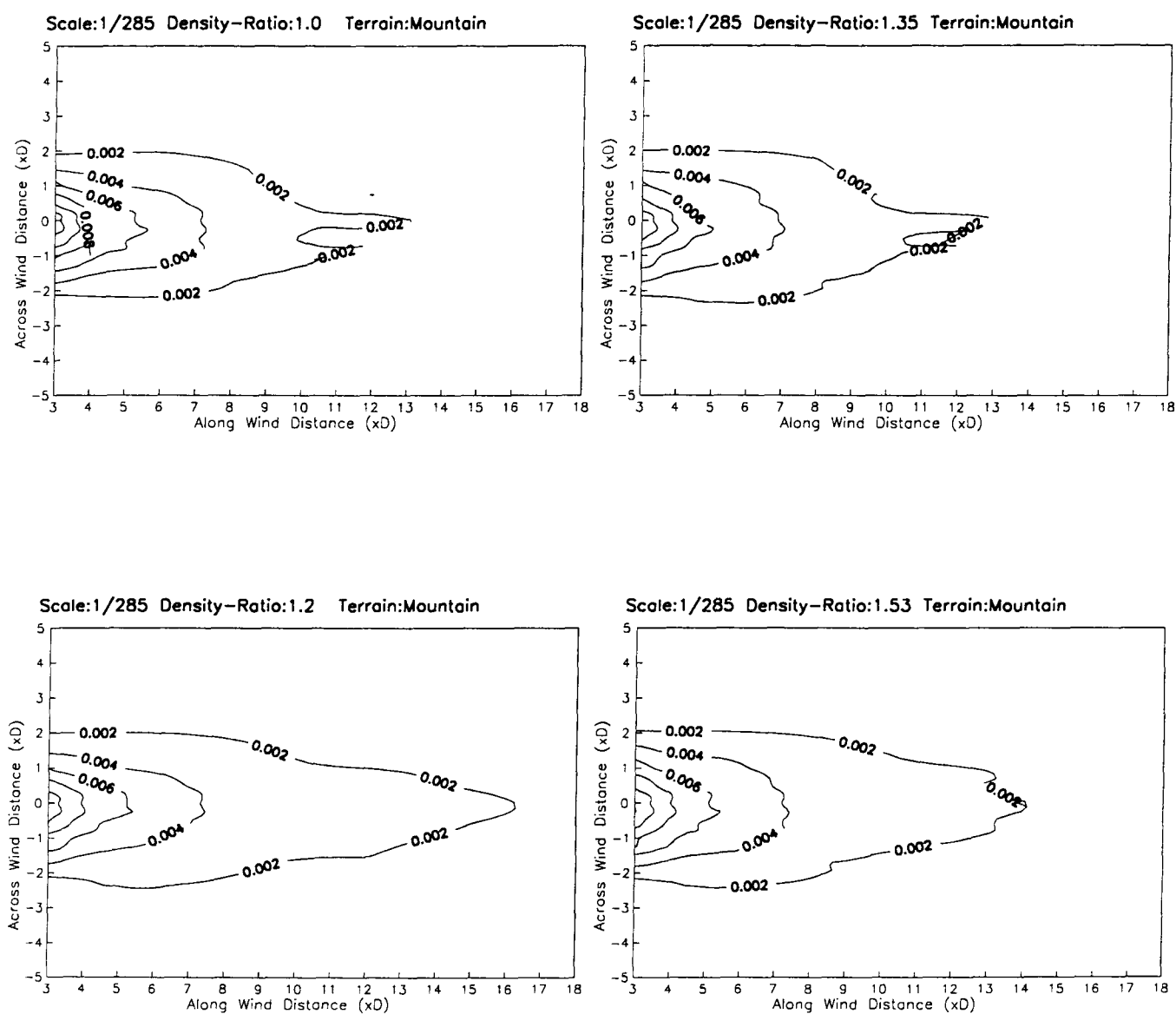


圖 5.3.25 縮尺 (1/285) 地形地物 (mountain) 固定，不同密度比之濃度係數分佈

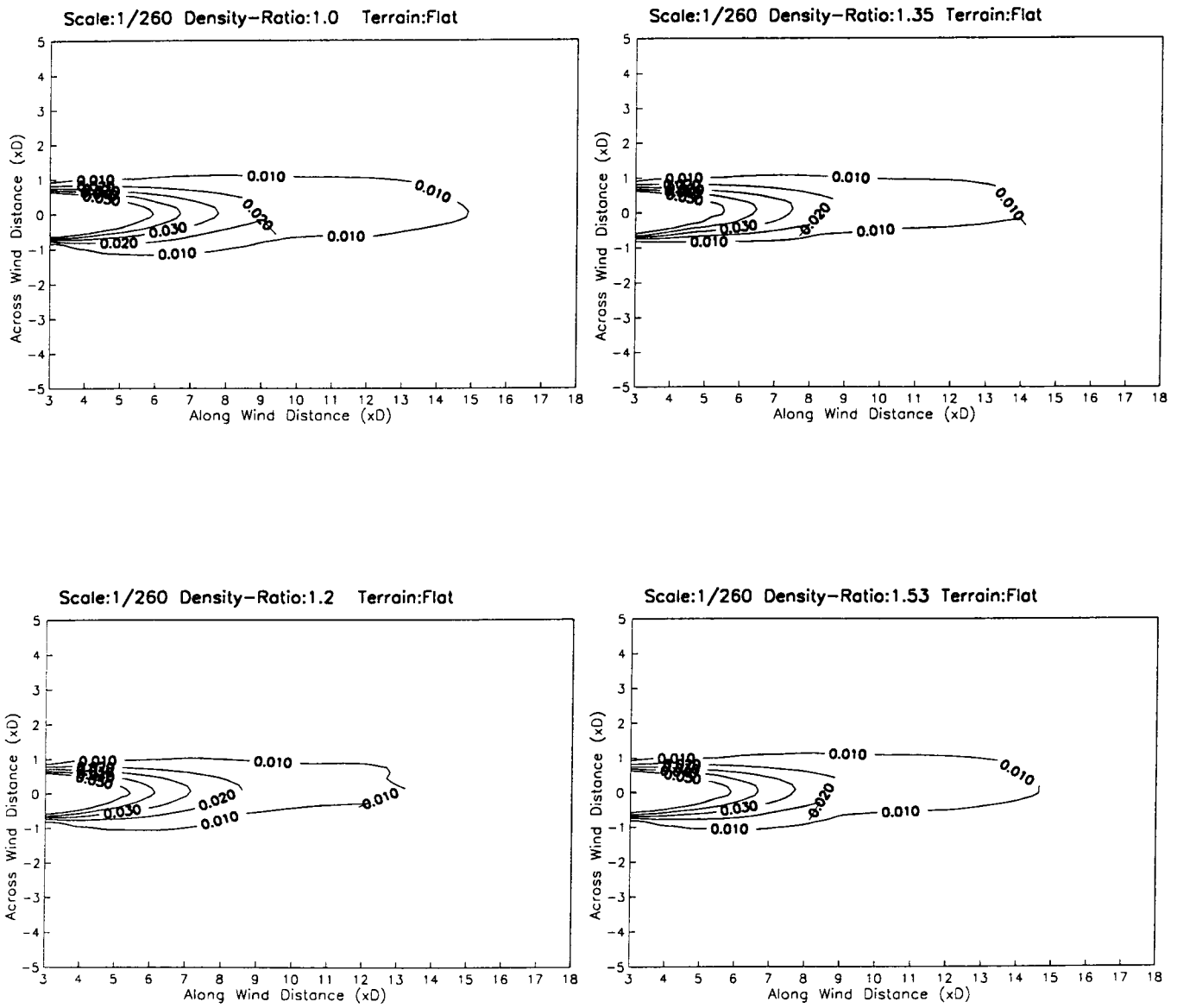


圖 5.3.26 縮尺 (1/260) 地形地物 (flat) 固定，不同密度比之濃度係數分佈

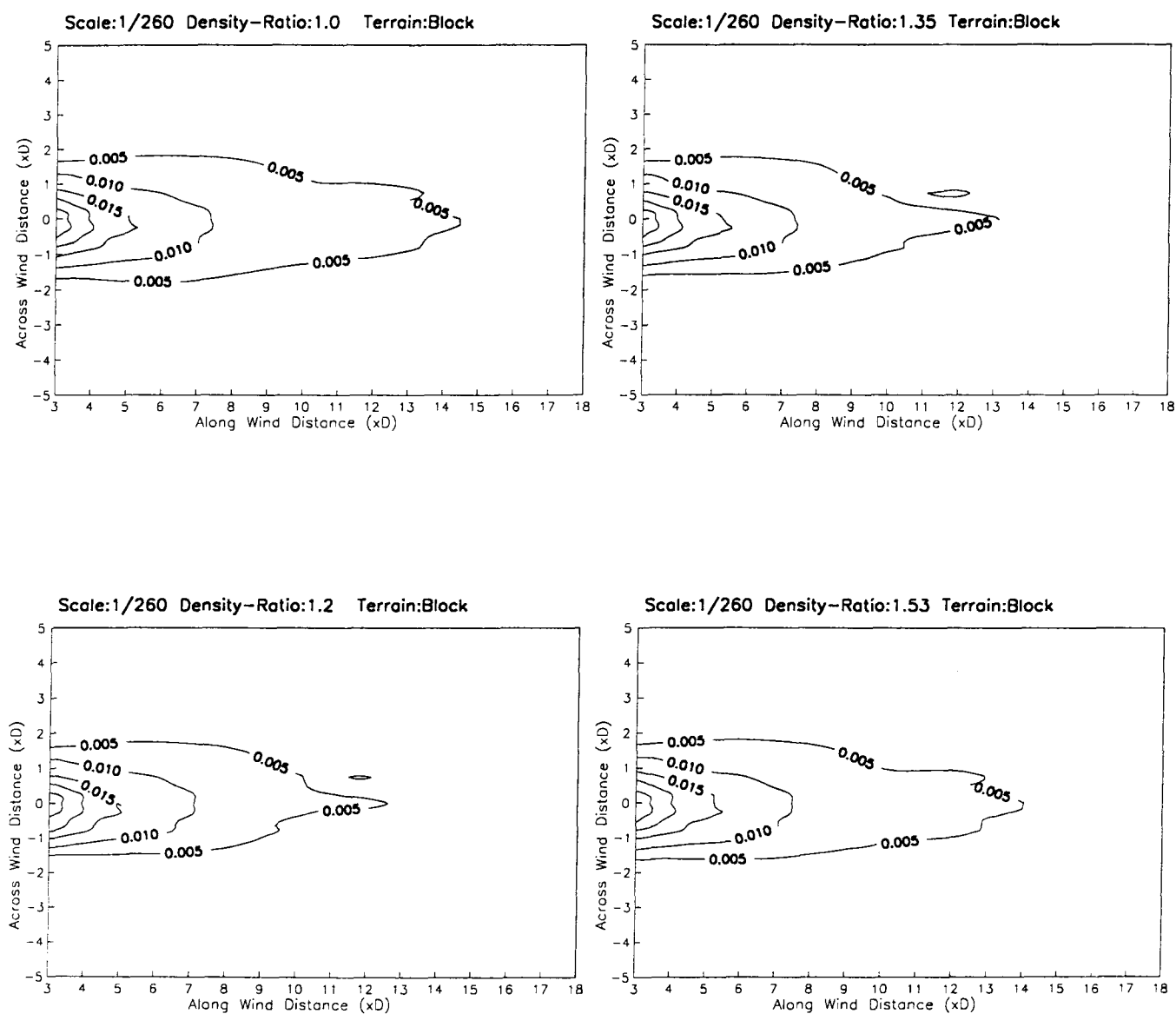


圖 5.3.27 縮尺 (1/260) 地形地物 (block) 固定，不同密度比之濃度係數分佈

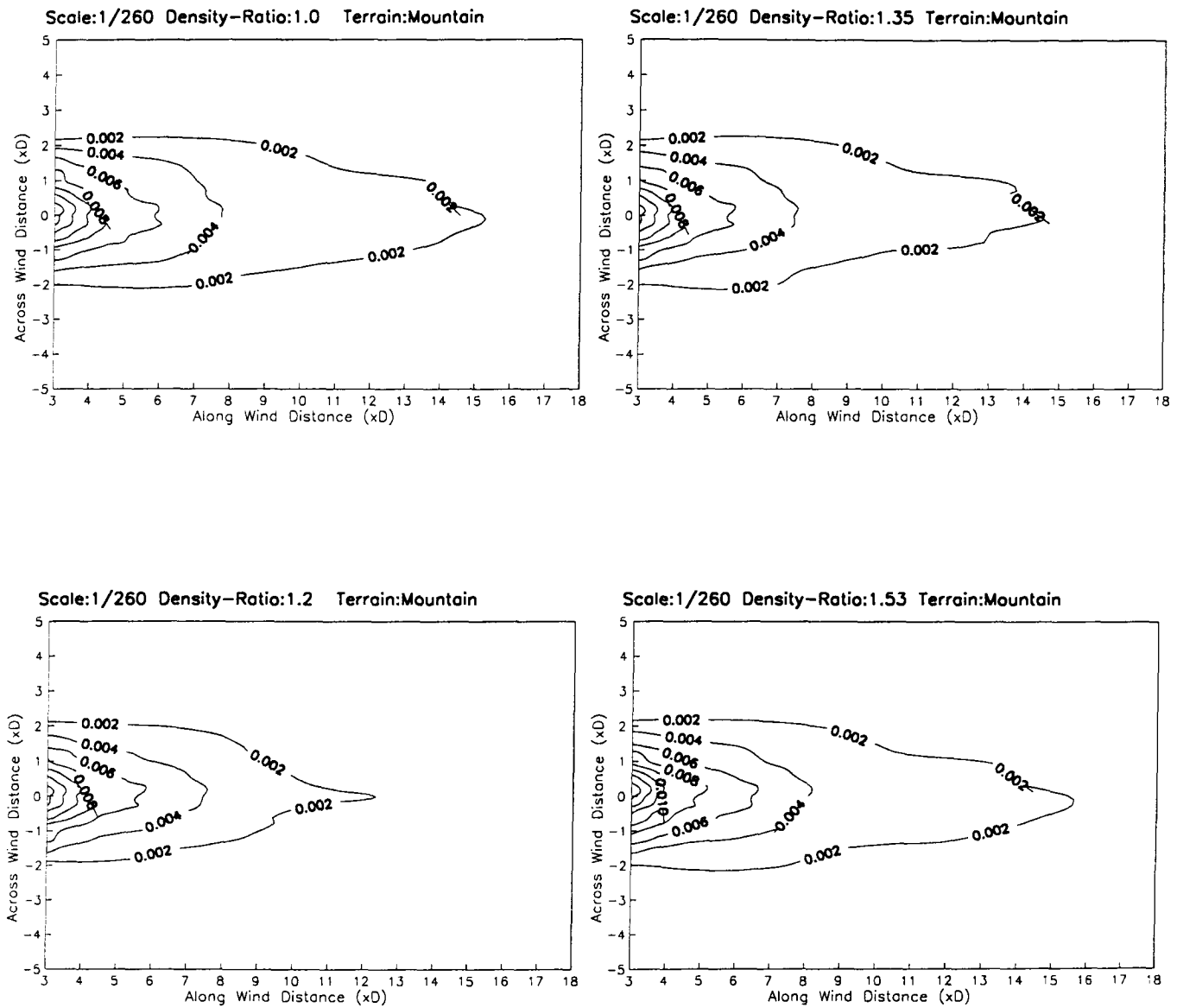


圖 5.3.28 縮尺 (1/260) 地形地物 (mountain) 固定，不同密度比之濃度係數分佈

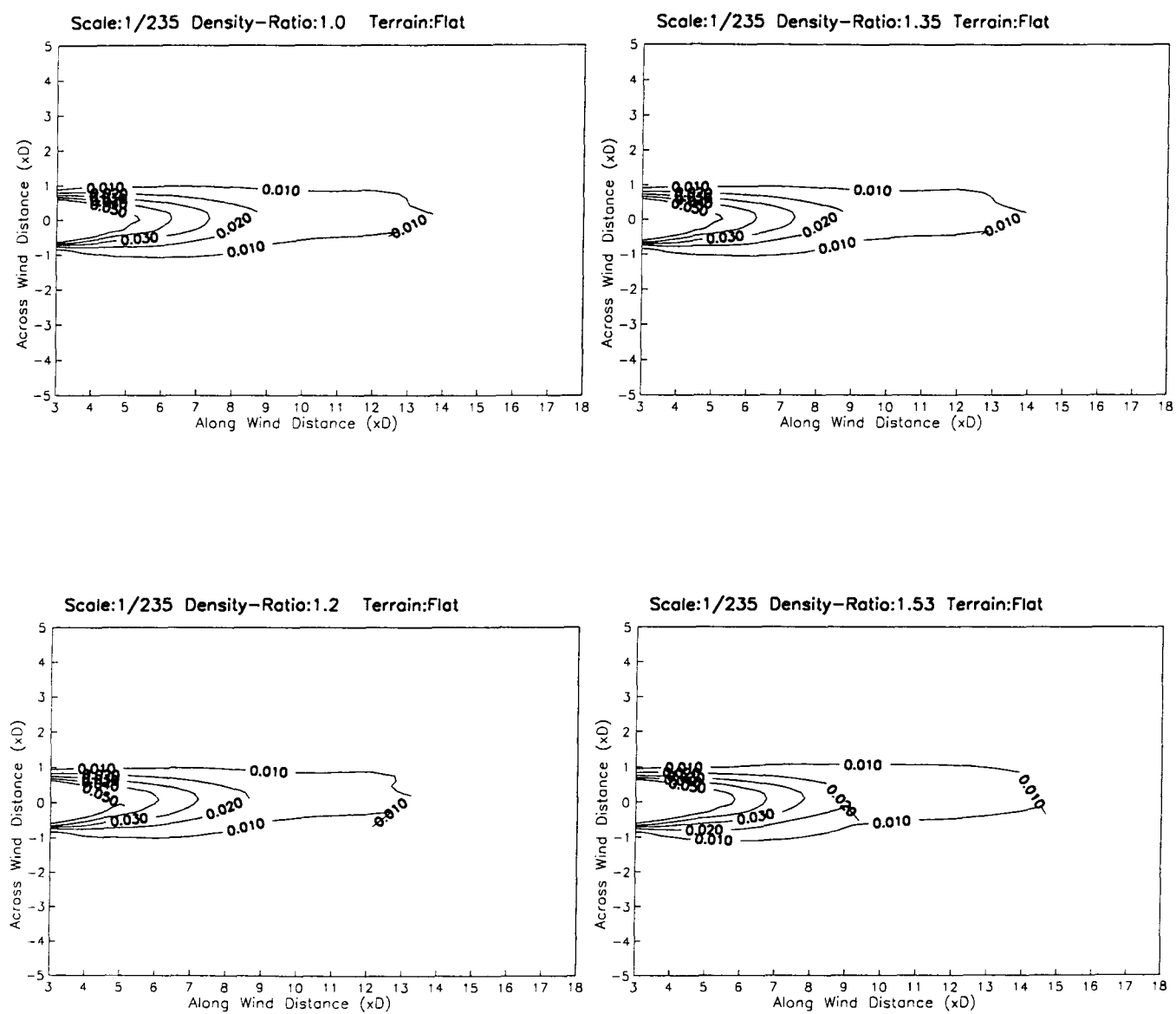


圖 5.3.29 縮尺 (1/235) 地形地物 (flat) 固定，不同密度比之濃度係數分佈

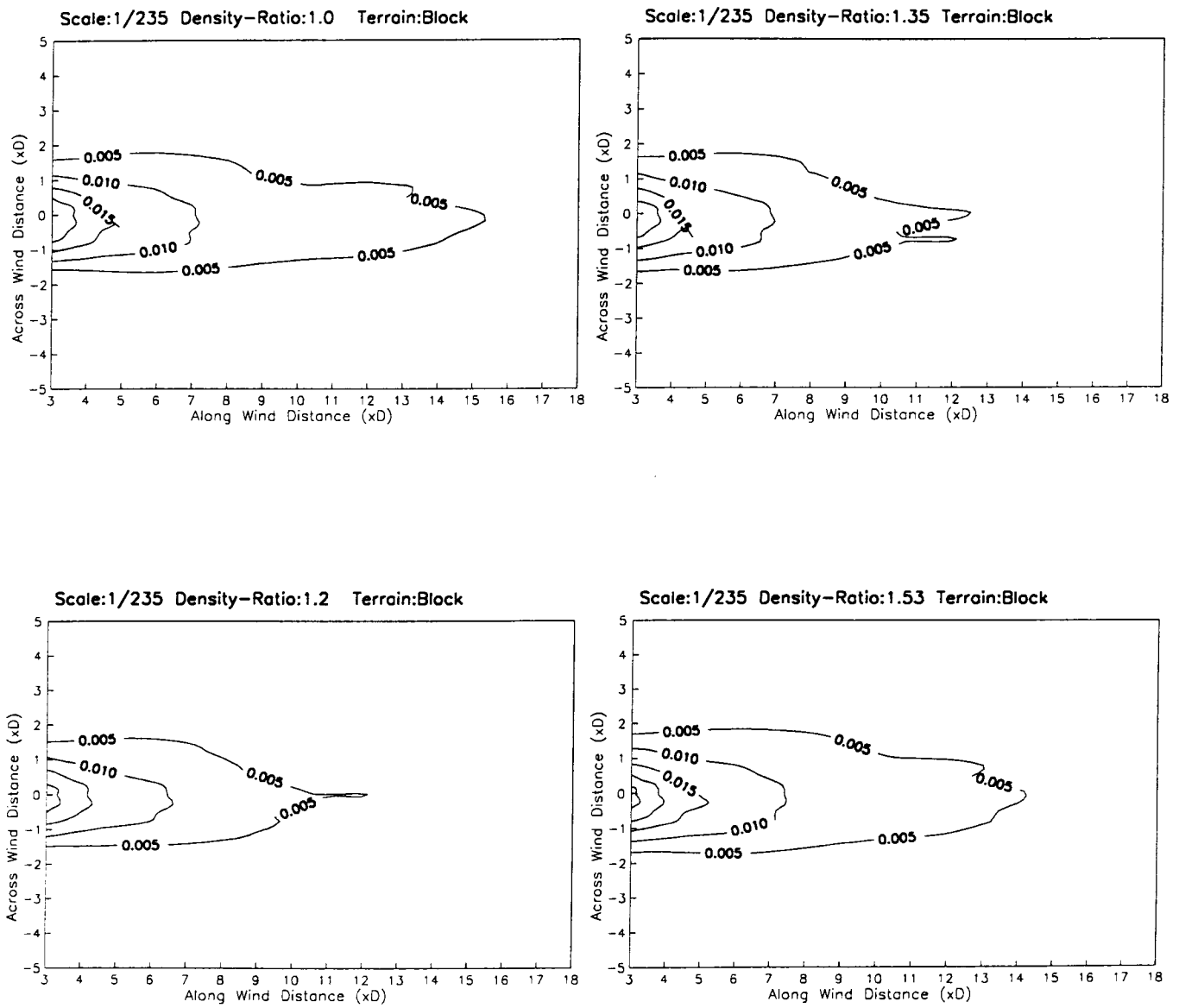


圖 5.3.30 縮尺 (1/235) 地形地物 (block) 固定，不同密度比之濃度係數分佈

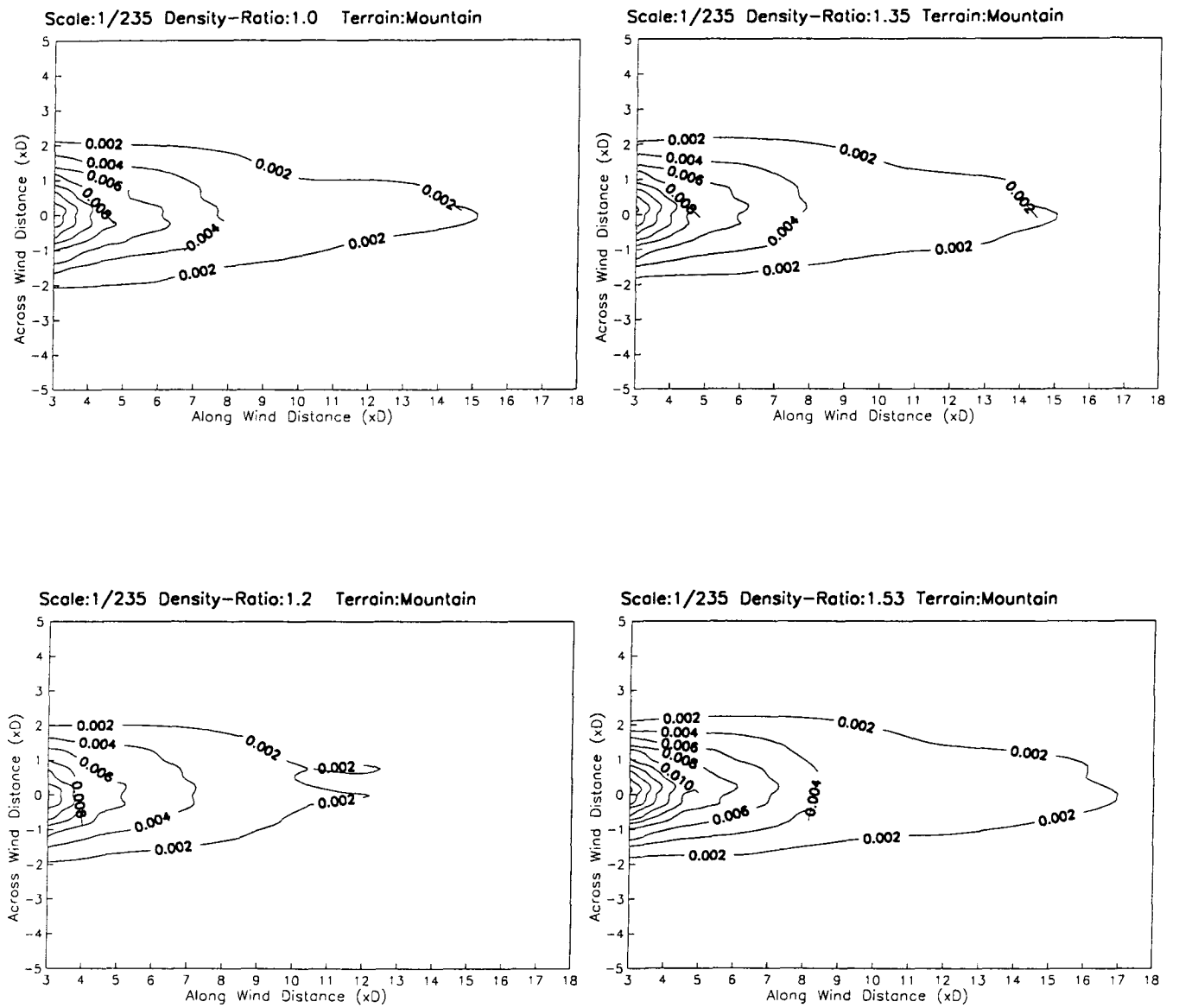


圖 5.3.31 縮尺 (1/235) 地形地物 (mountain) 固定，不同密度比之濃度係數分佈



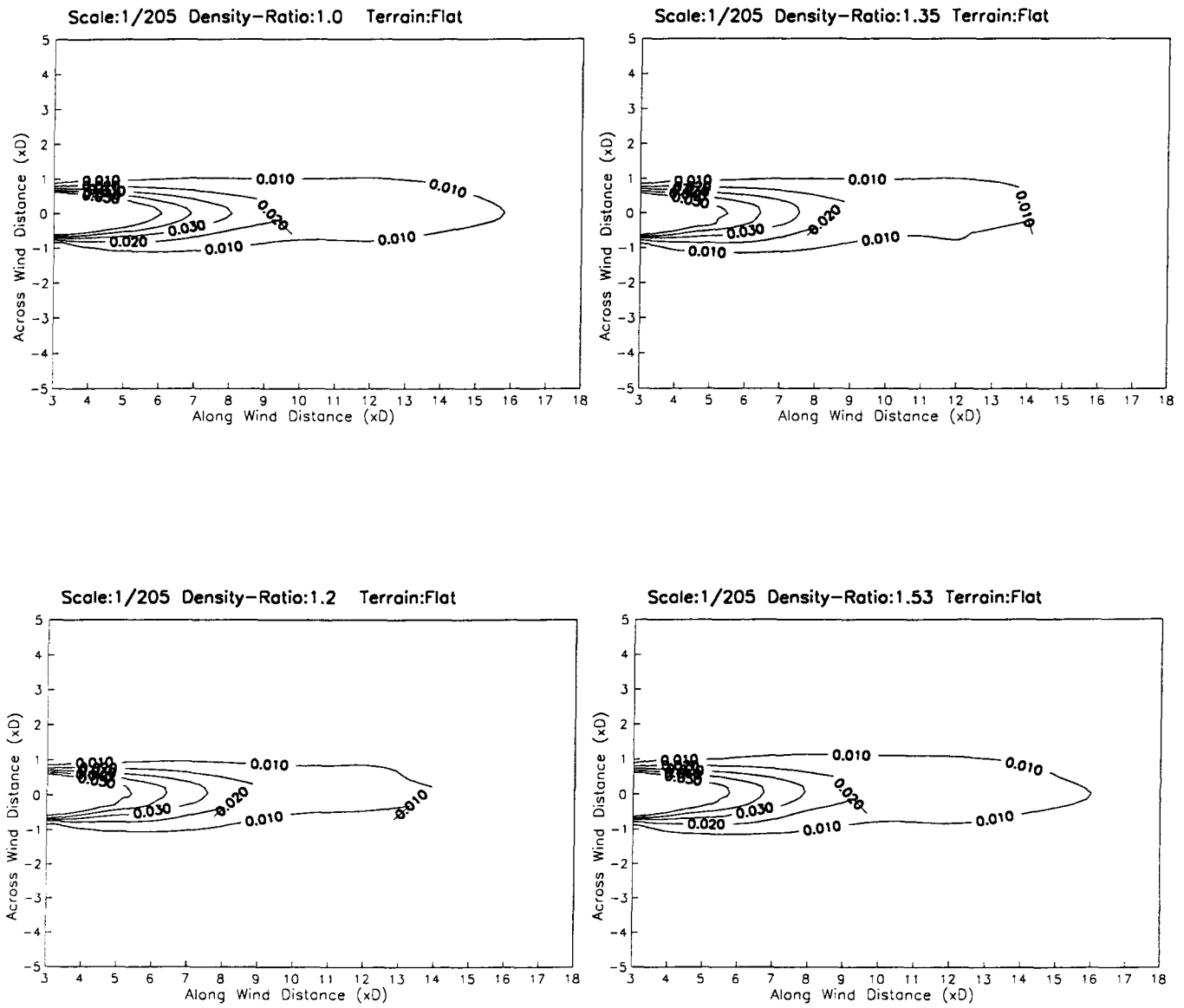


圖 5.3.32 縮尺 (1/205) 地形地物 (flat) 固定，不同密度比之濃度係數分佈

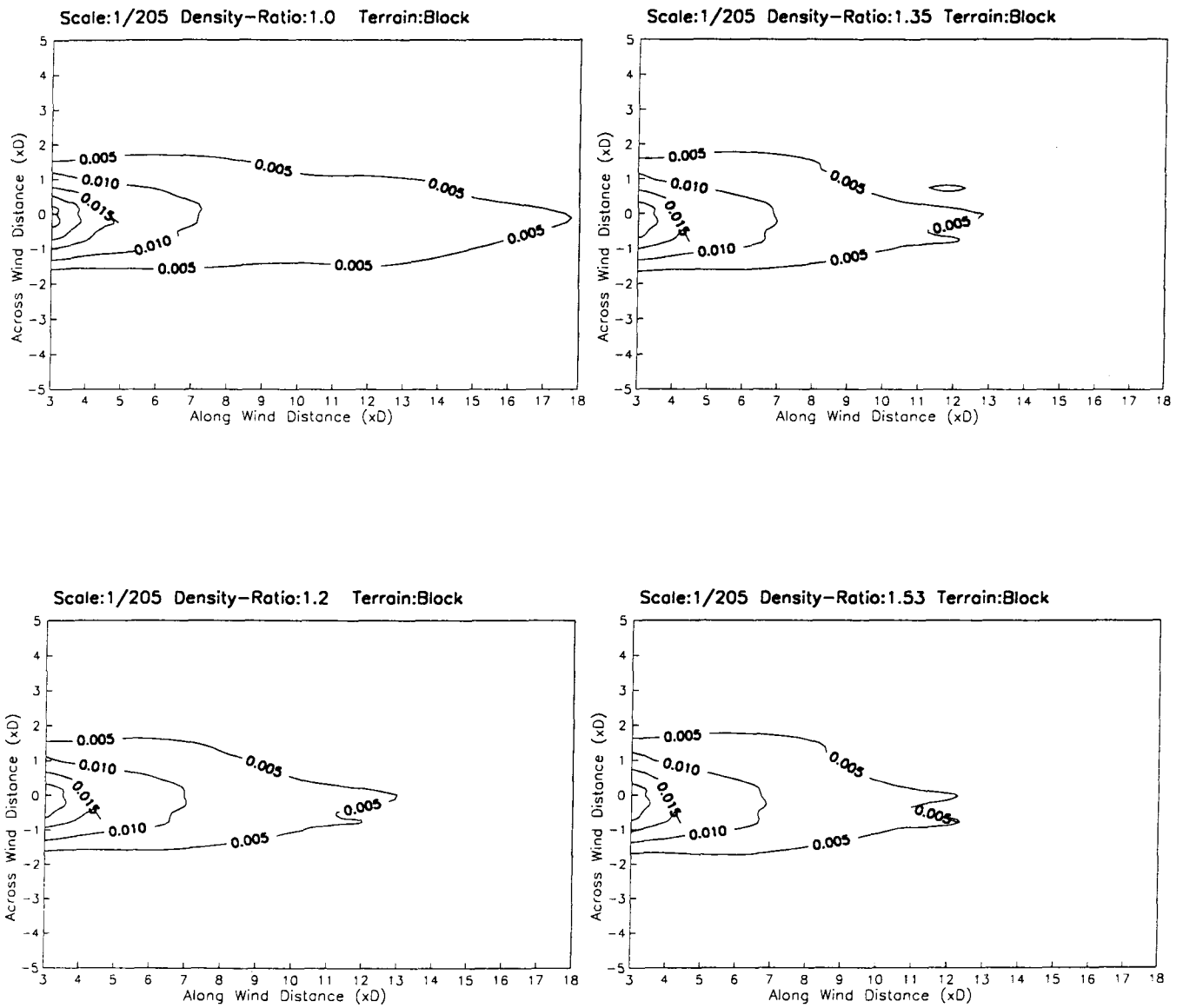


圖 5.3.33 縮尺 (1/205) 地形地物 (block) 固定，不同密度比之濃度係數分佈

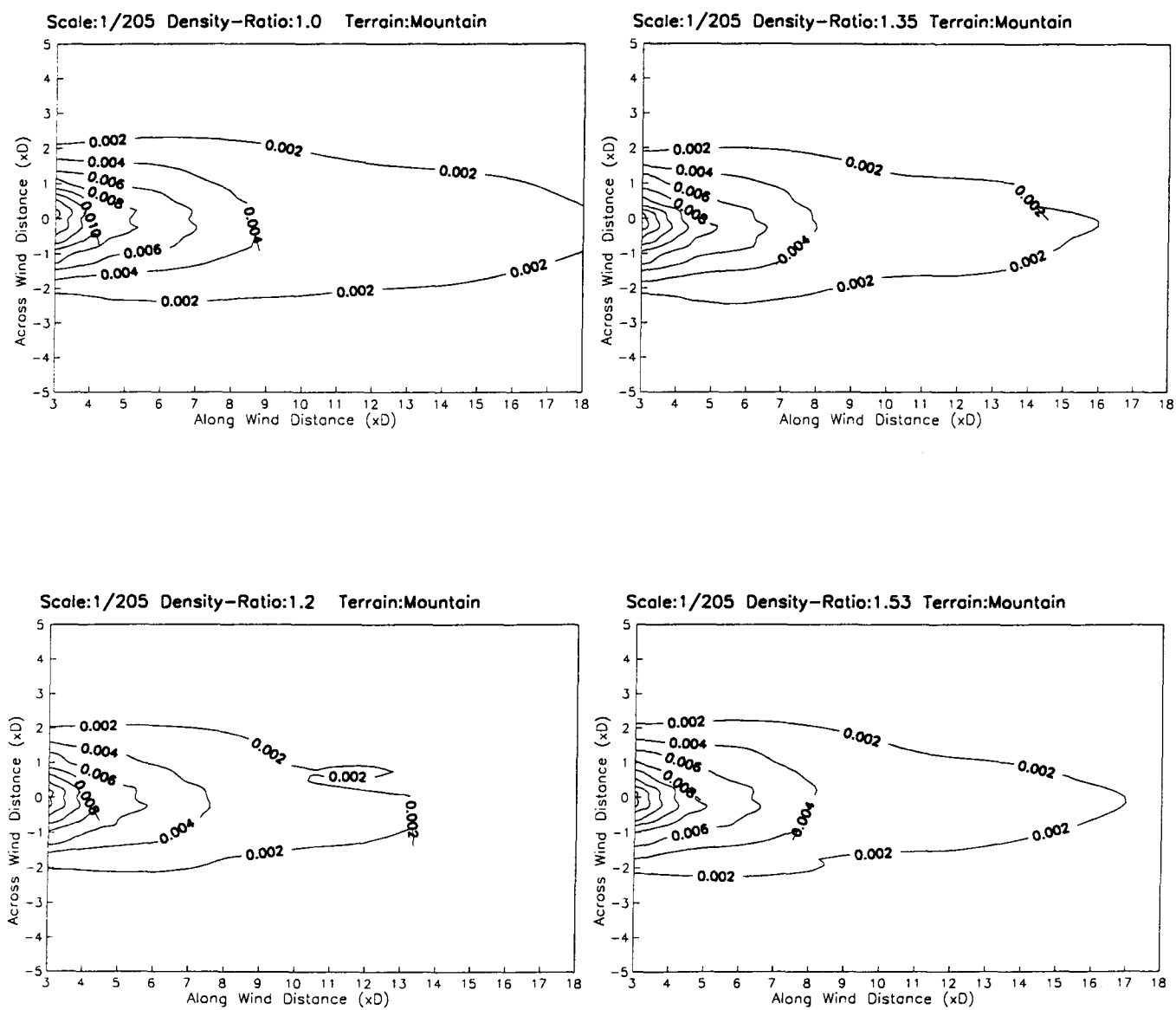


圖 5.3.34 縮尺 (1/205) 地形地物 (mountain) 固定，不同密度比之濃度係數分佈

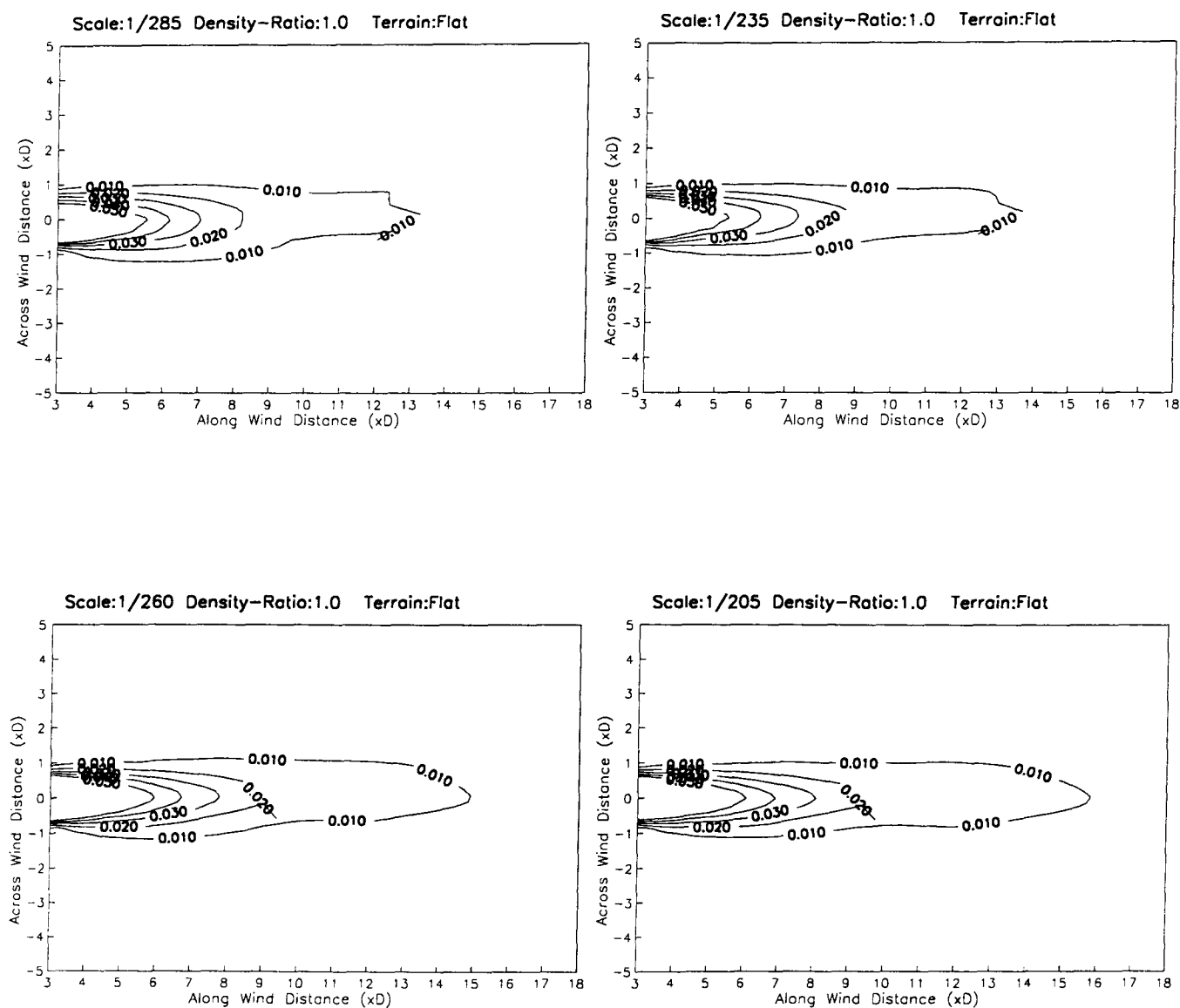


圖 5.3.35 密度比 (1.0) 地形地物 (flat) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈

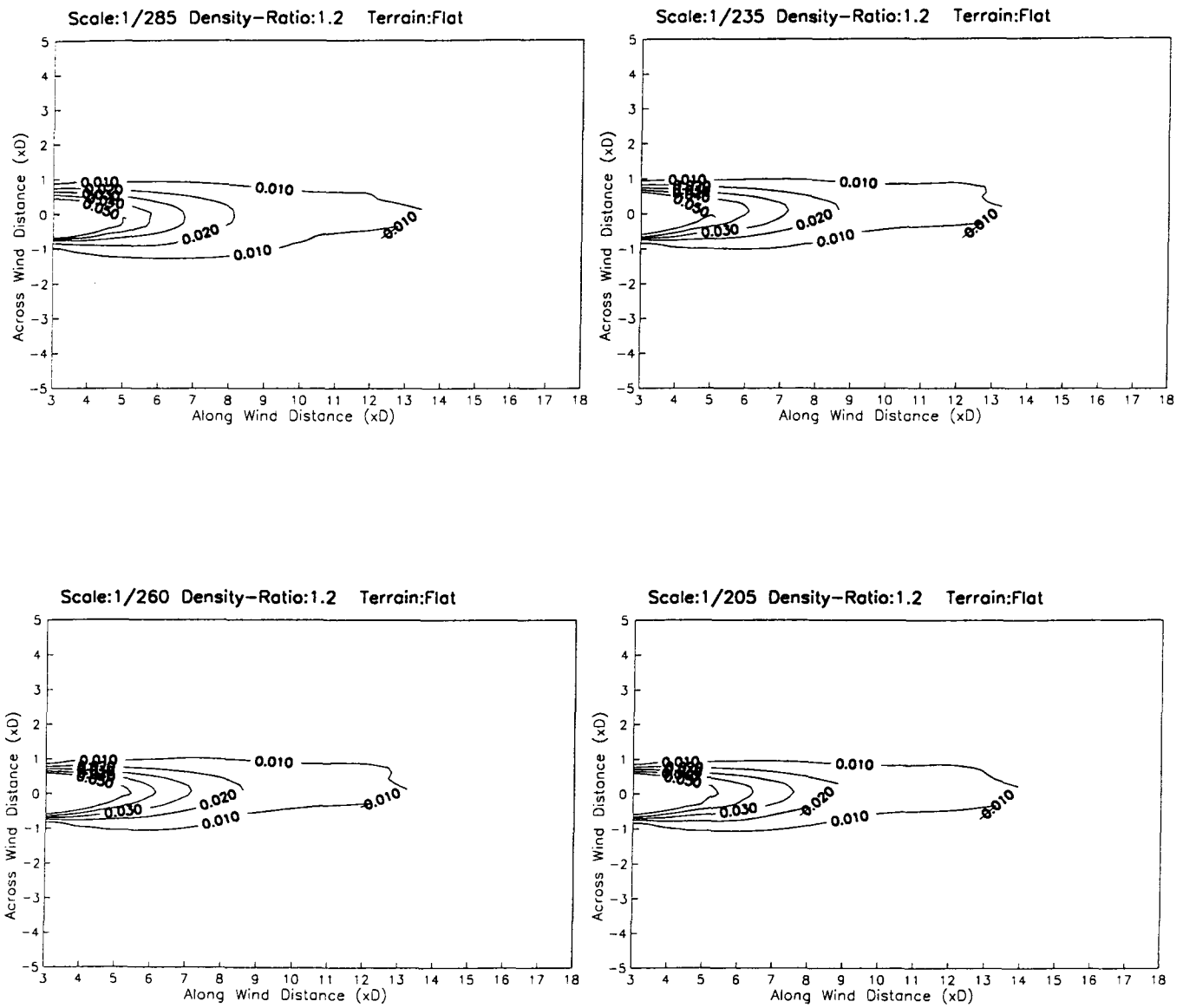


圖 5.3.36 密度比 (1.2) 地形地物 (flat) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈

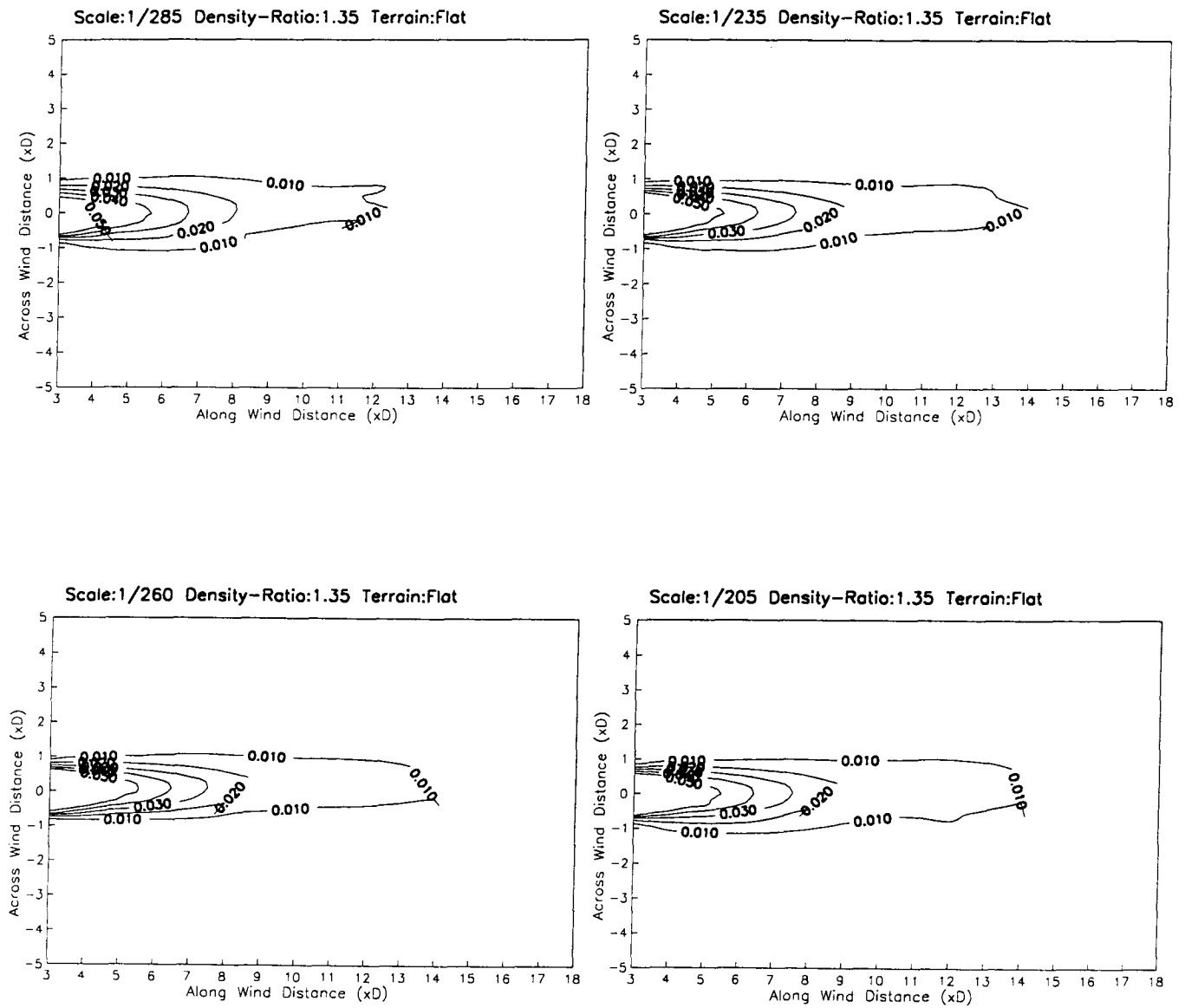


圖 5.3.37 密度比 (1.35) 地形地物 (flat) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈

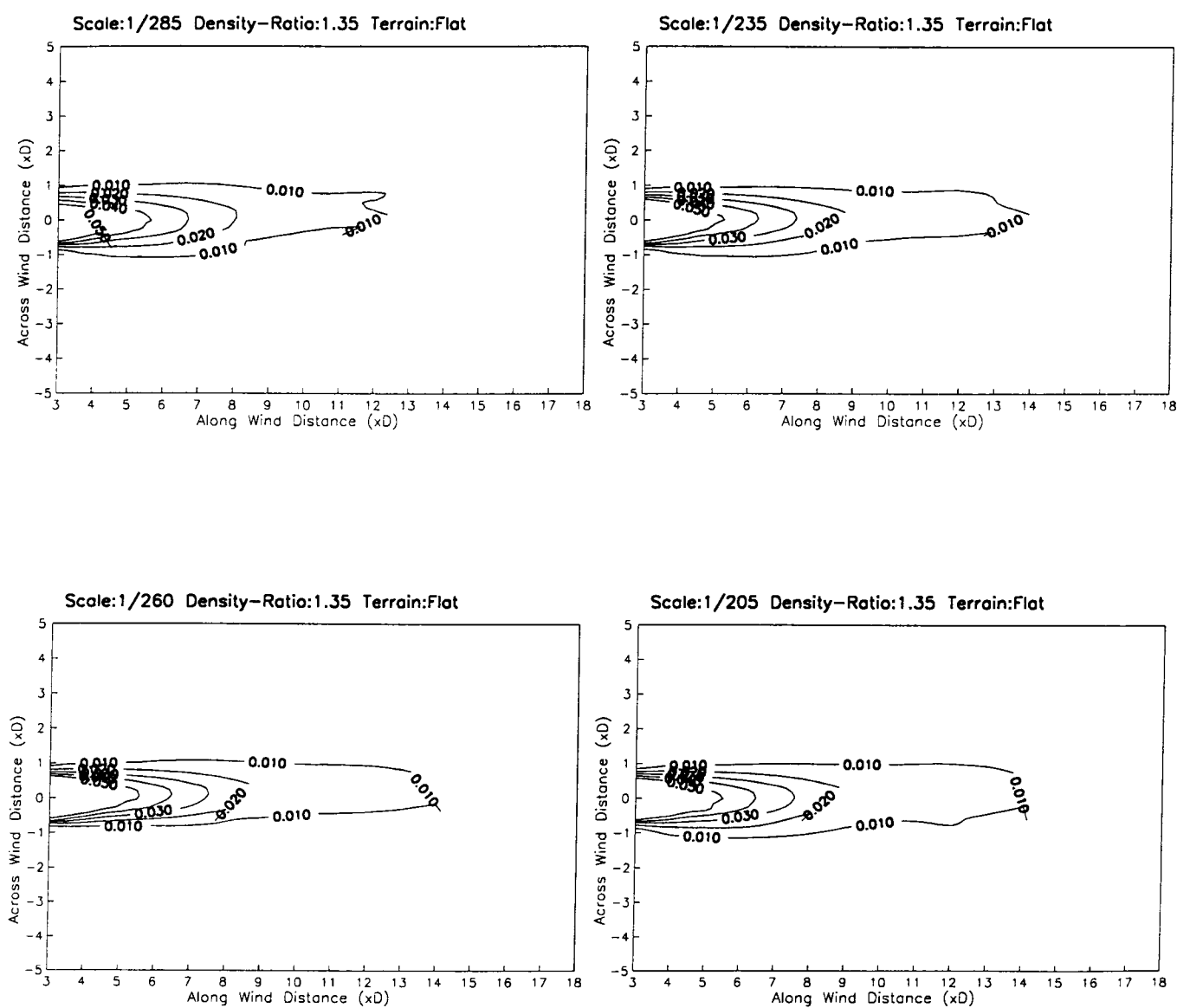


圖 5.3.38 密度比 (1.53) 地形地物 (flat) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈

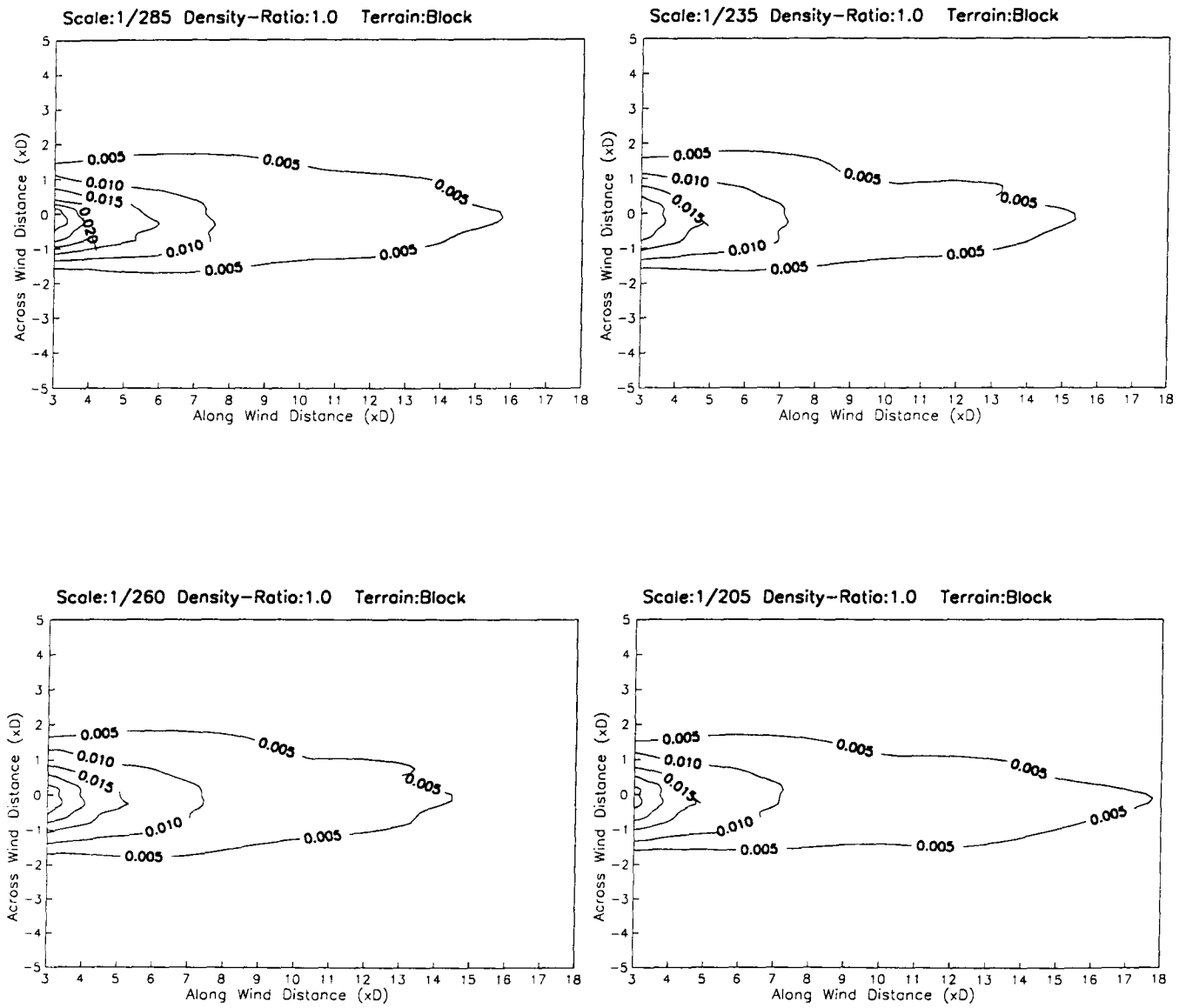


圖 5.3.39 密度比 (1.0) 地形地物 (block) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈



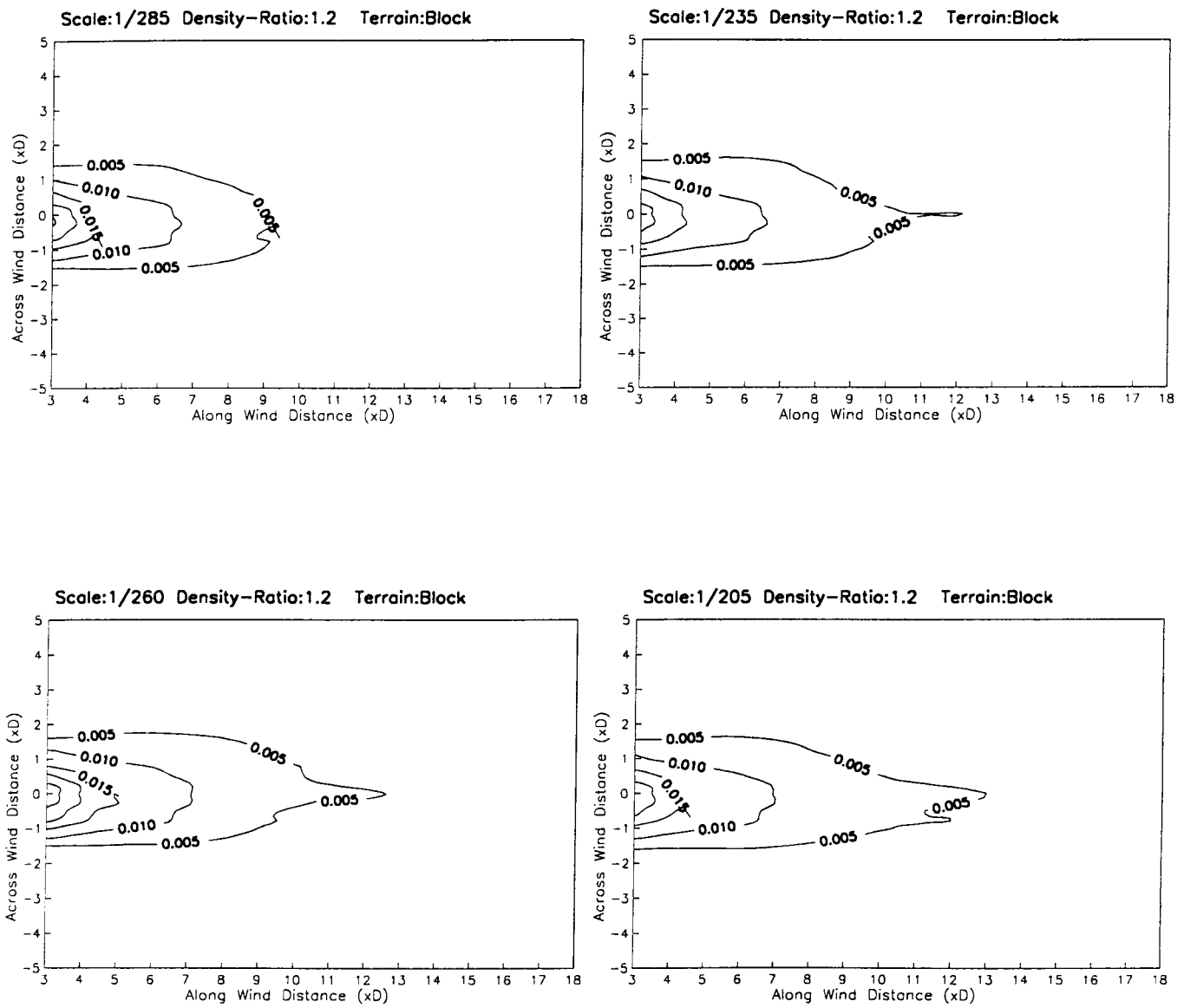


圖 5.3.40 密度比 (1.2) 地形地物 (block) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈

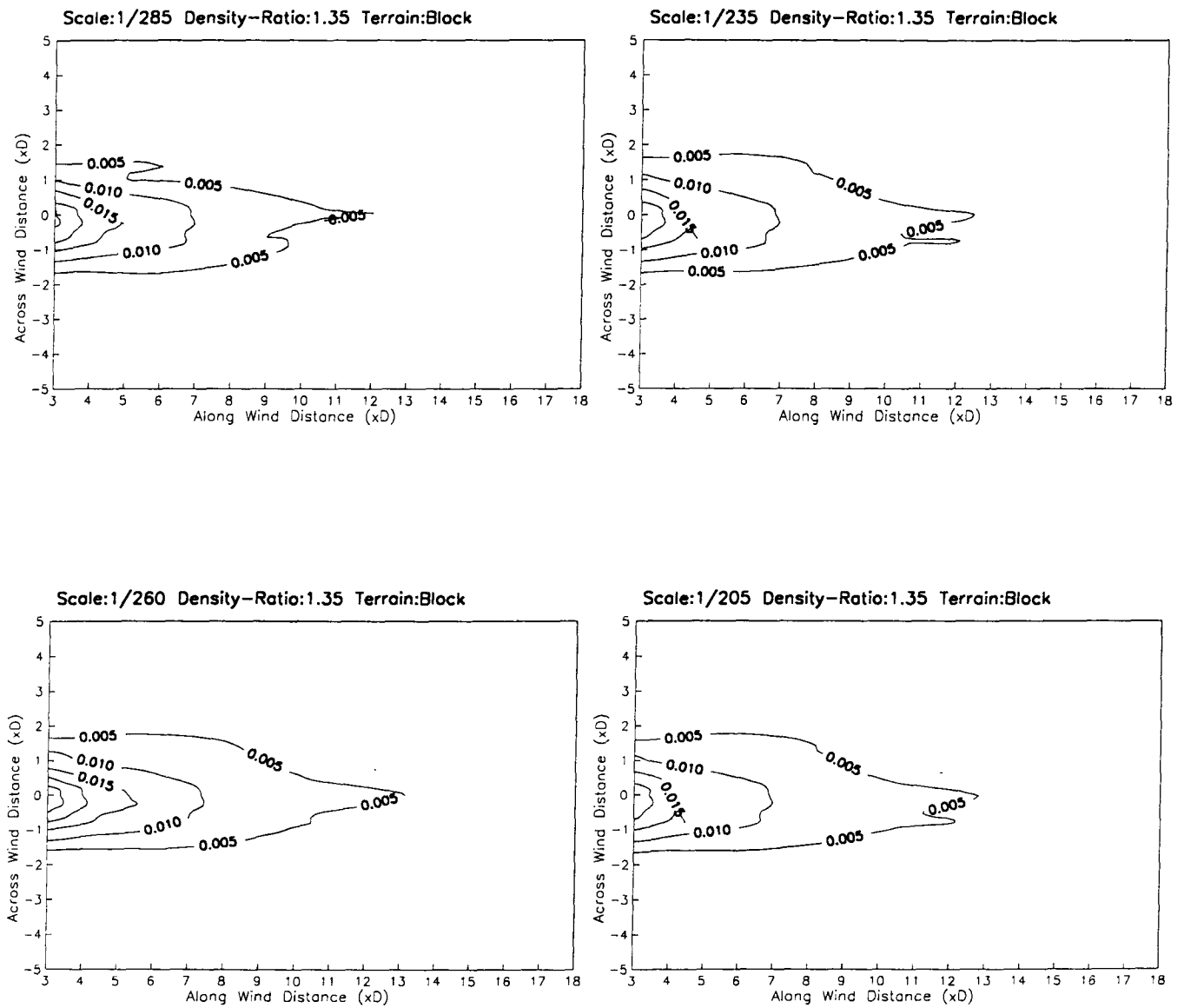


圖 5.3.41 密度比 (1.35) 地形地物 (block) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈

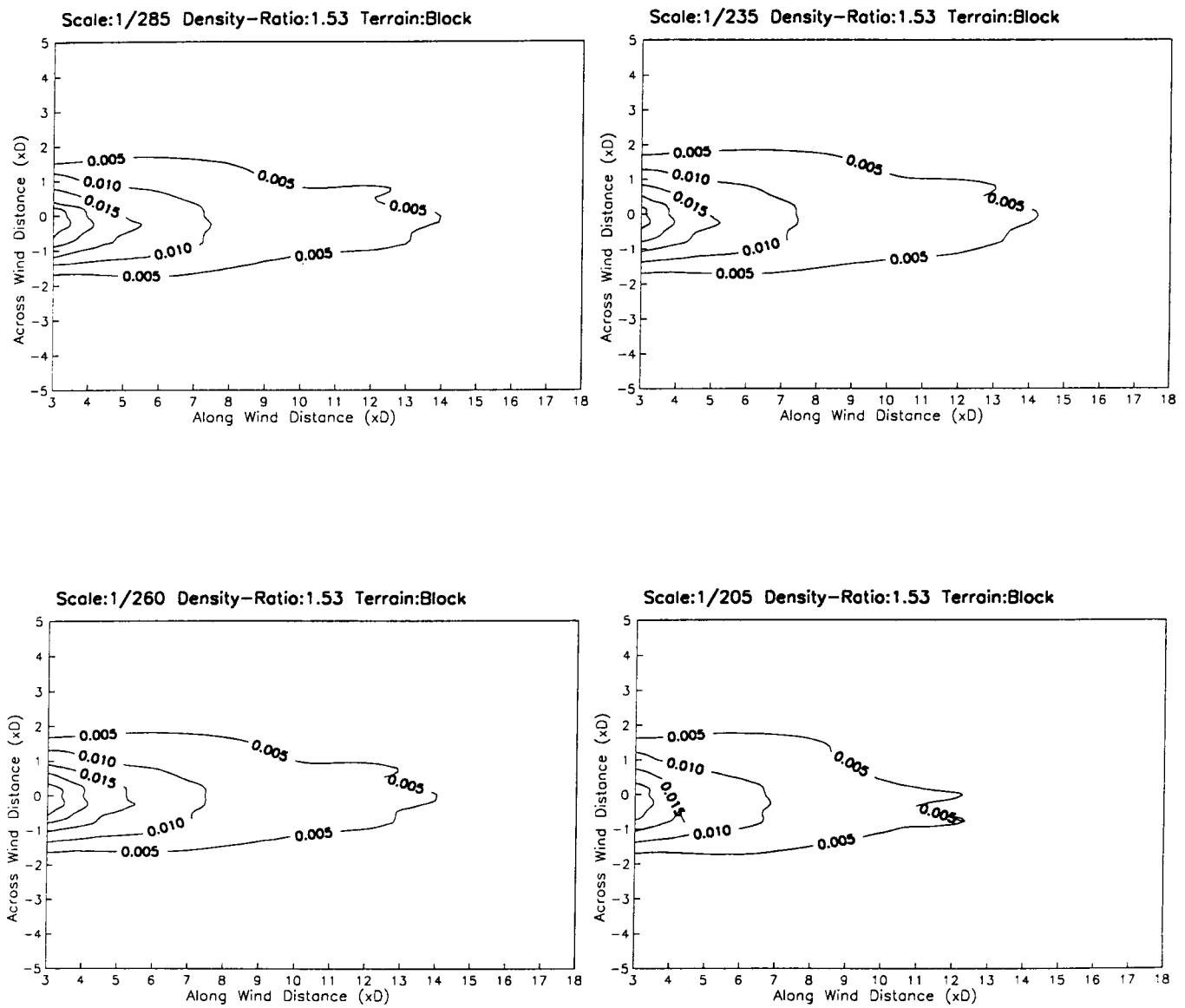


圖 5.3.42 密度比 (1.53) 地形地物 (block) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈

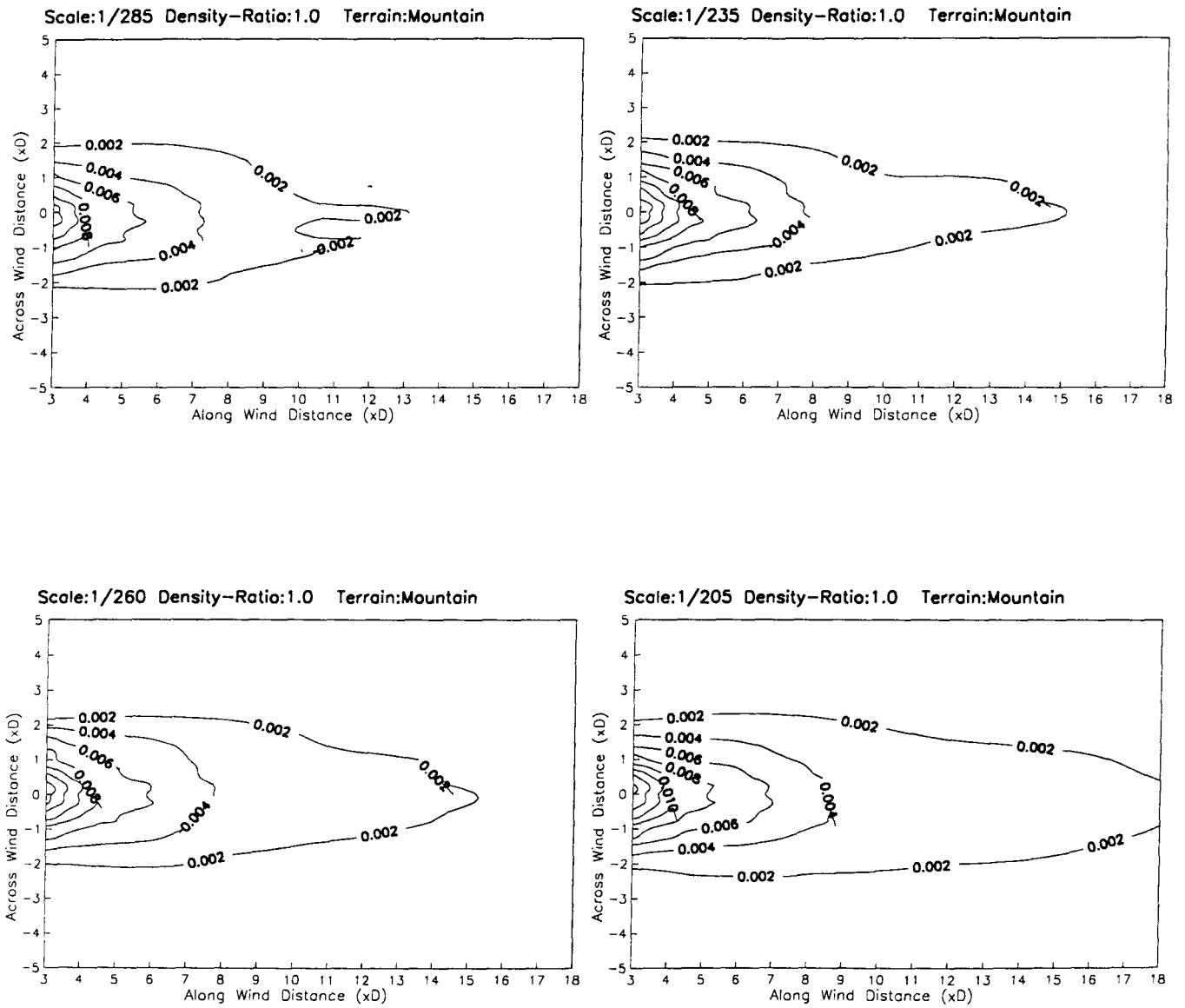


圖 5.3.43 密度比 (1.0) 地形地物 (mountain) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈

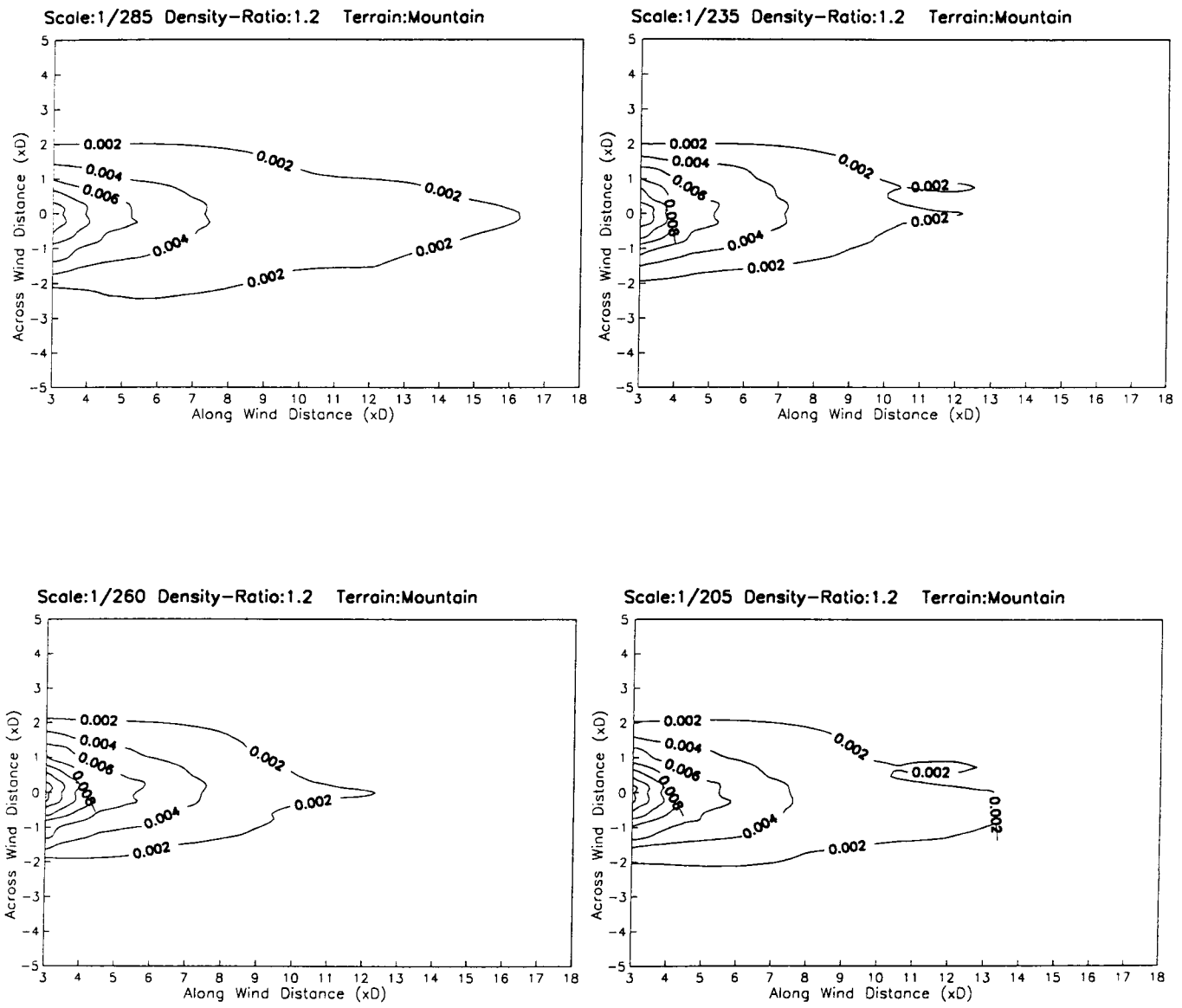


圖 5.3.44 密度比 (1.2) 地形地物 (mountain) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈

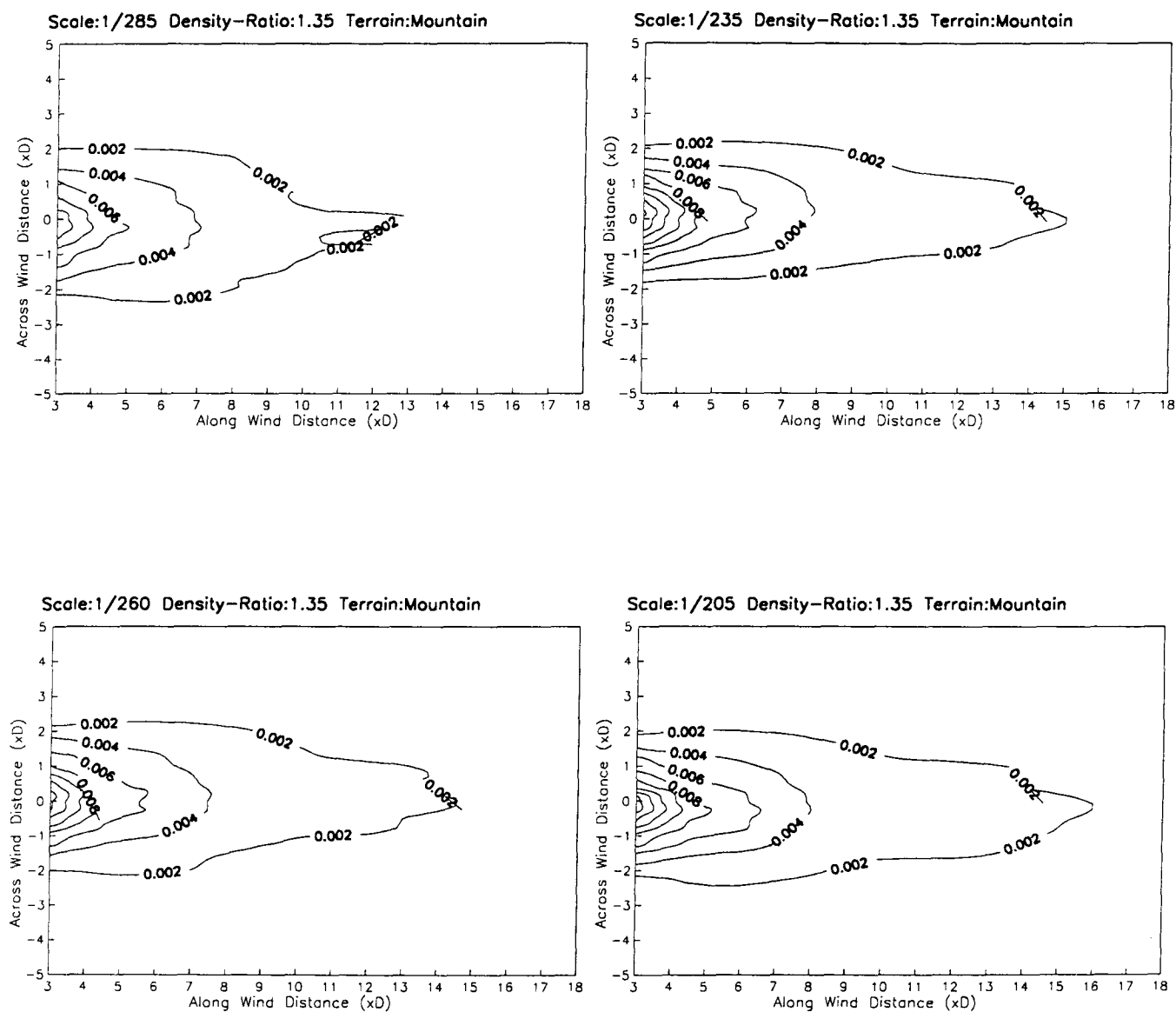


圖 5.3.45 密度比 (1.35) 地形地物 (mountain) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈

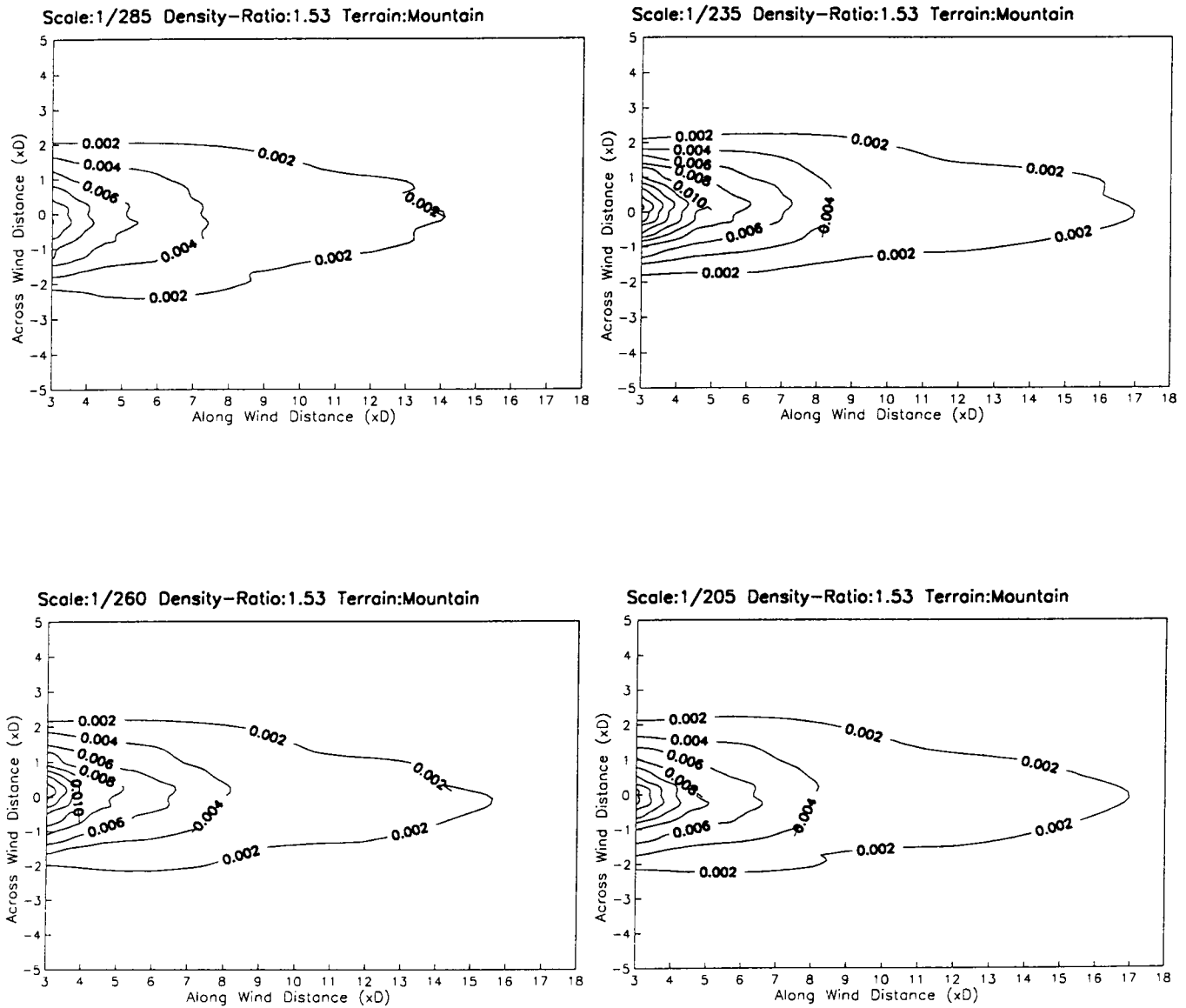


圖 5.3.46 密度比 (1.53) 地形地物 (mountain) 固定，不同縮尺之濃度係數分佈

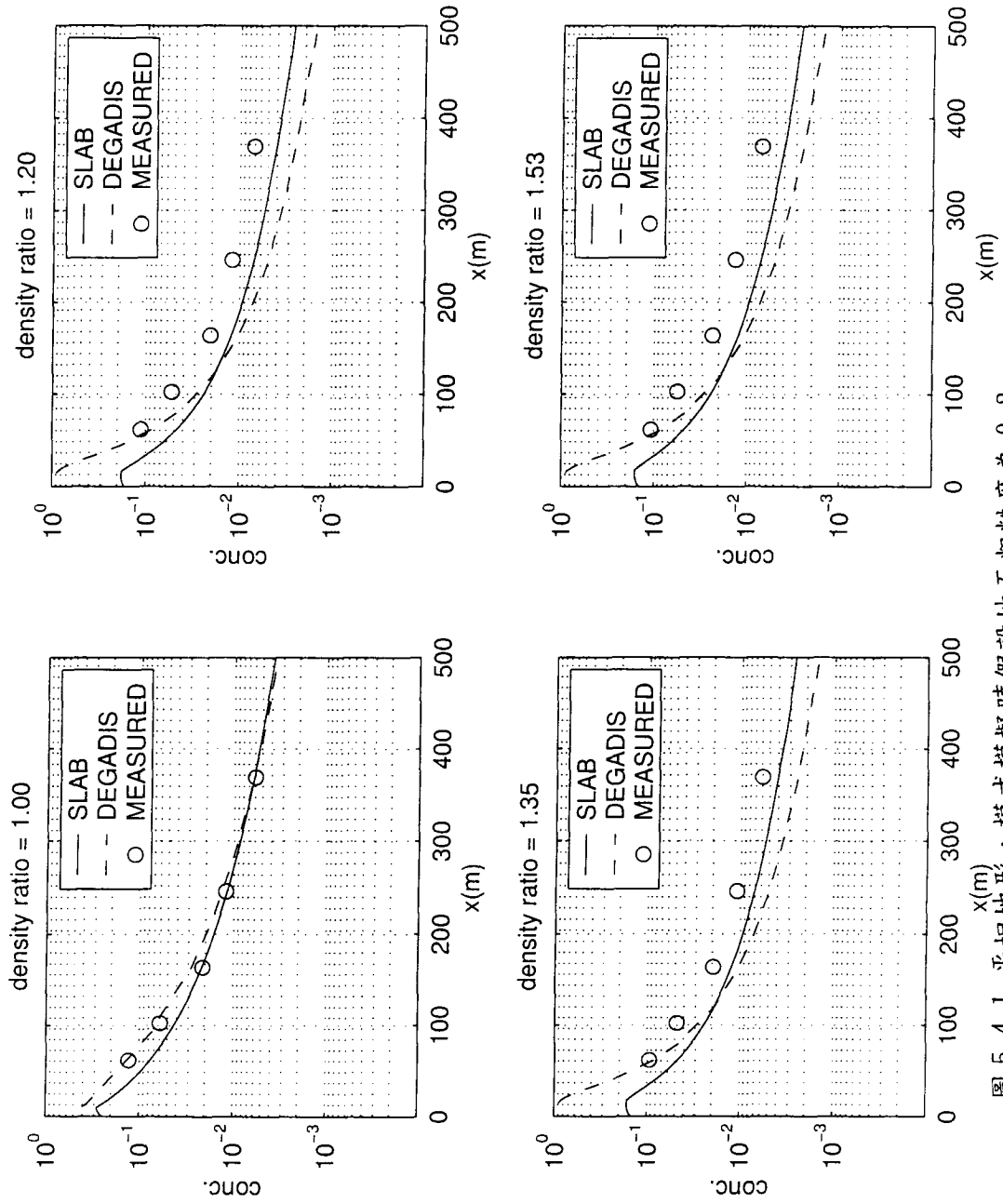


圖 5.4.1 平坦地形，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.3m，  
風洞實驗結果和模式模擬值之比較



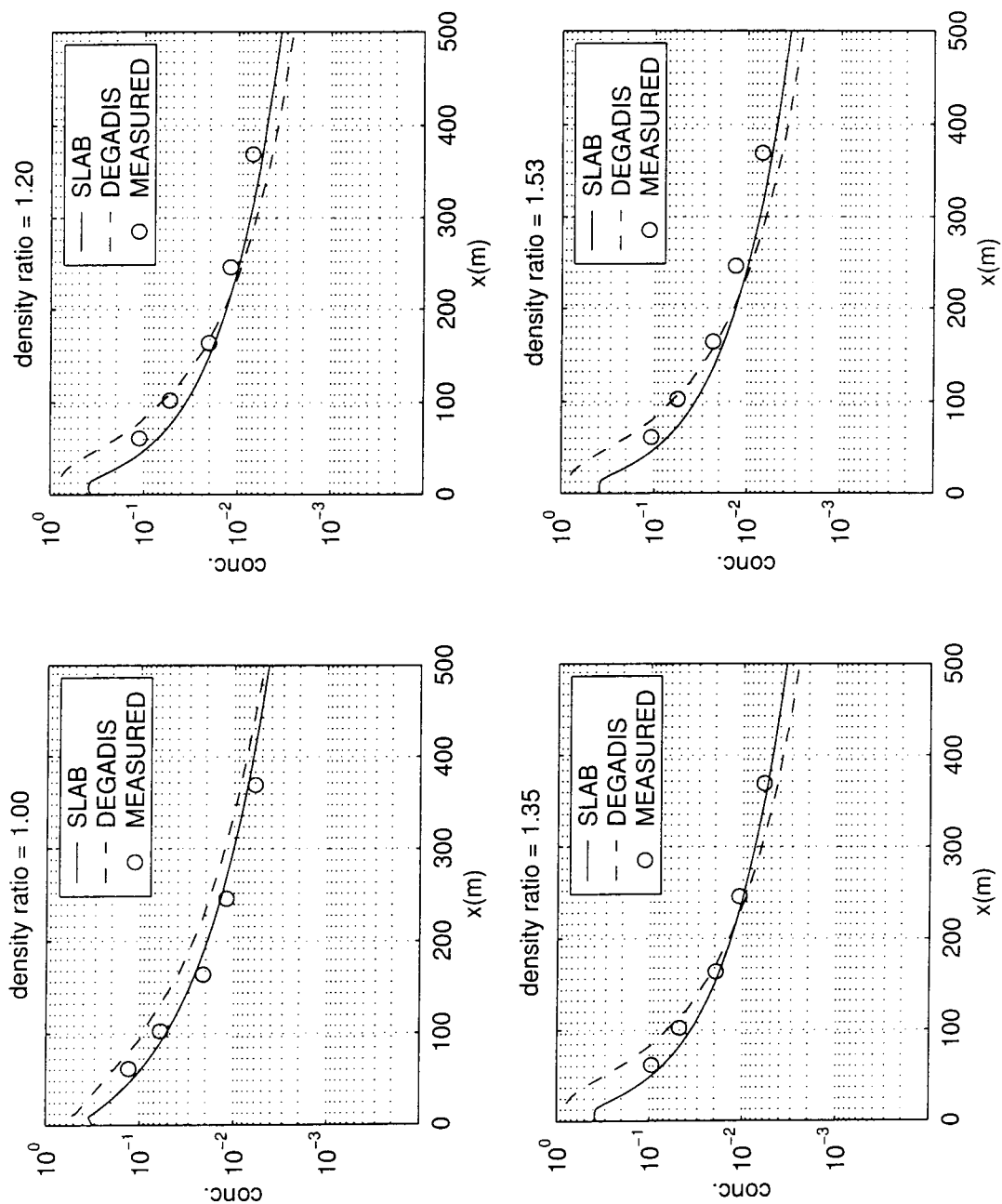


圖 5.4.2 平坦地形，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.1m，  
風洞實驗結果和模式模擬值之比較

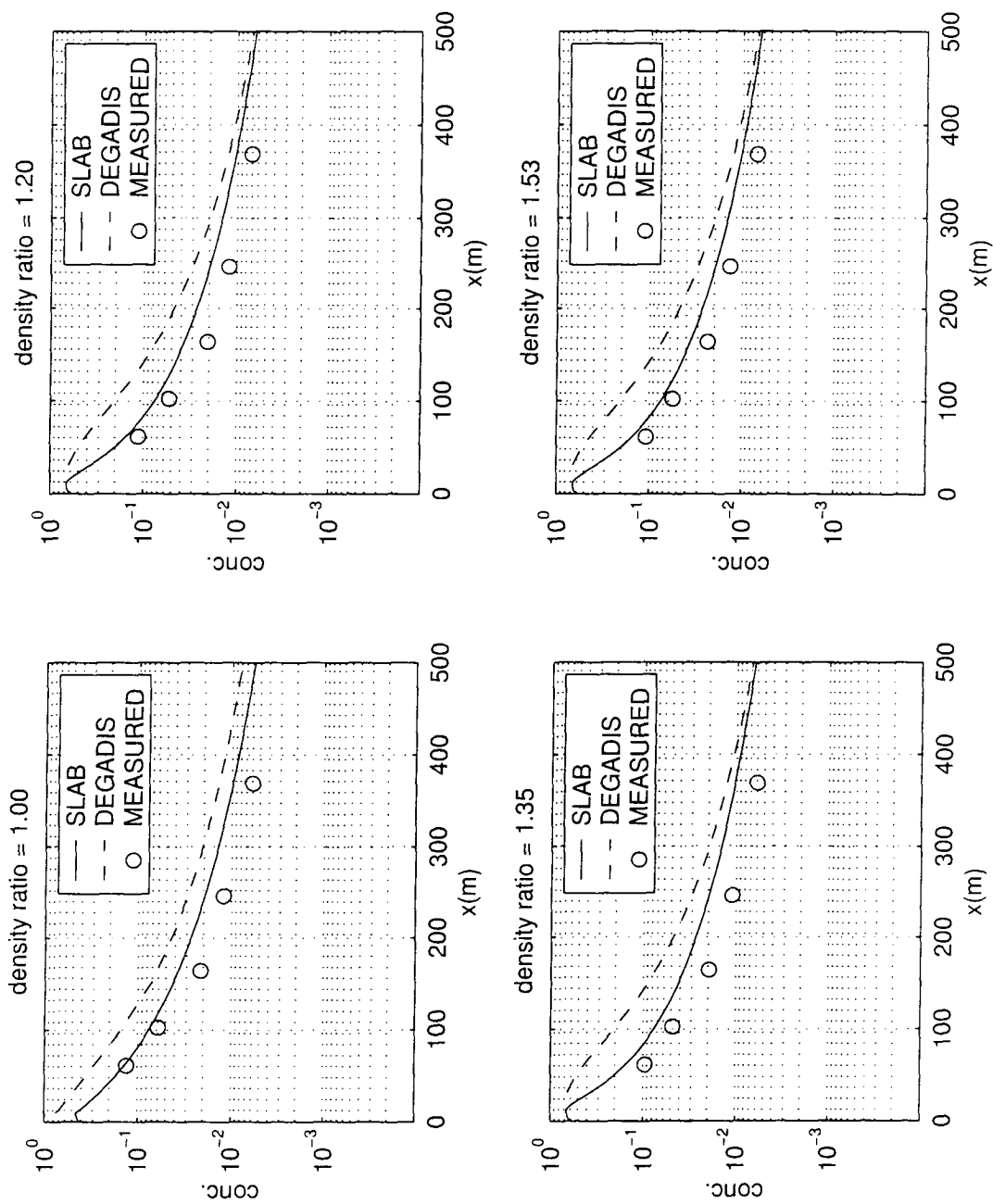
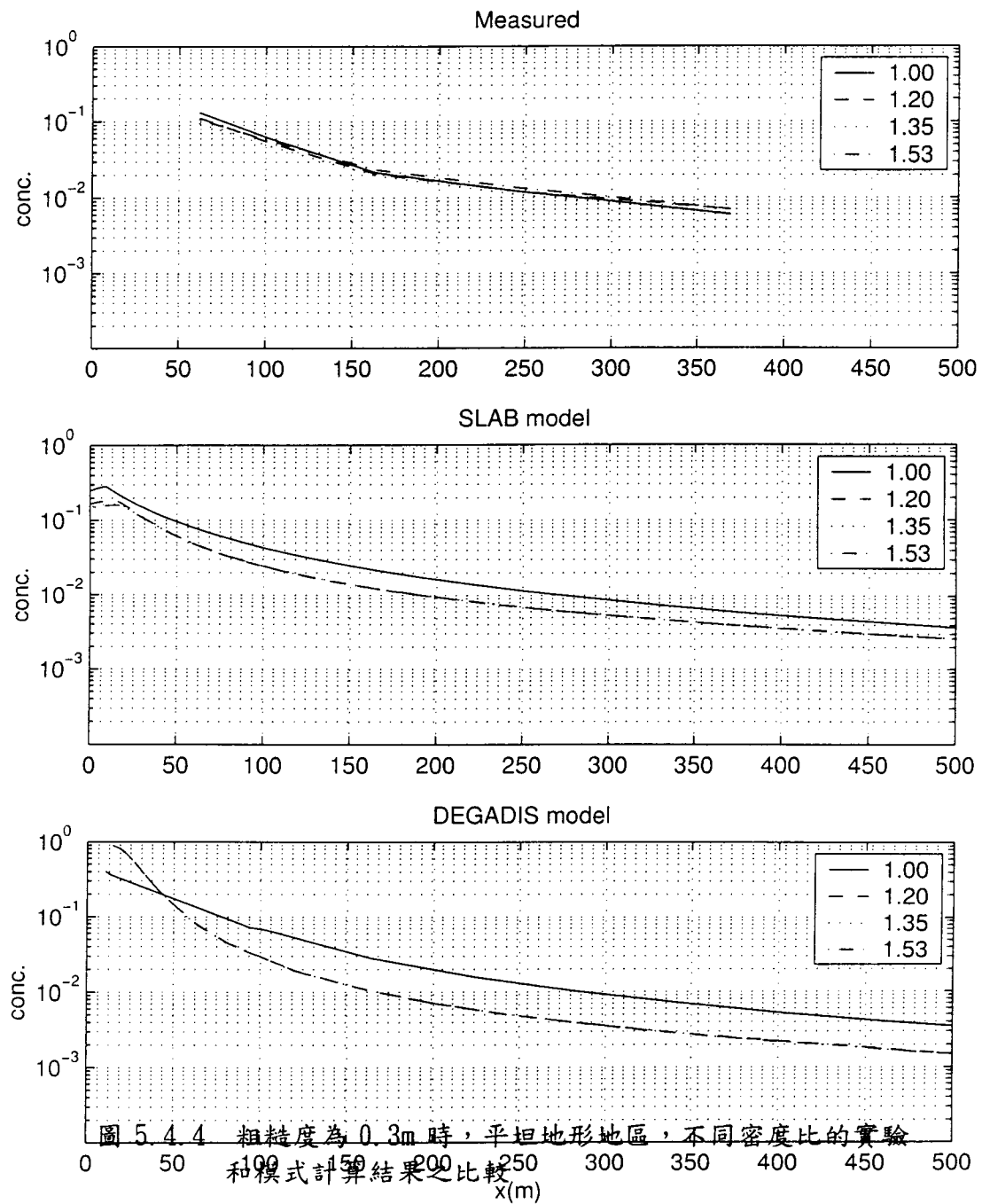


圖 5.4.3 平坦地形，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.01m，  
風洞實驗結果和模式模擬值之比較



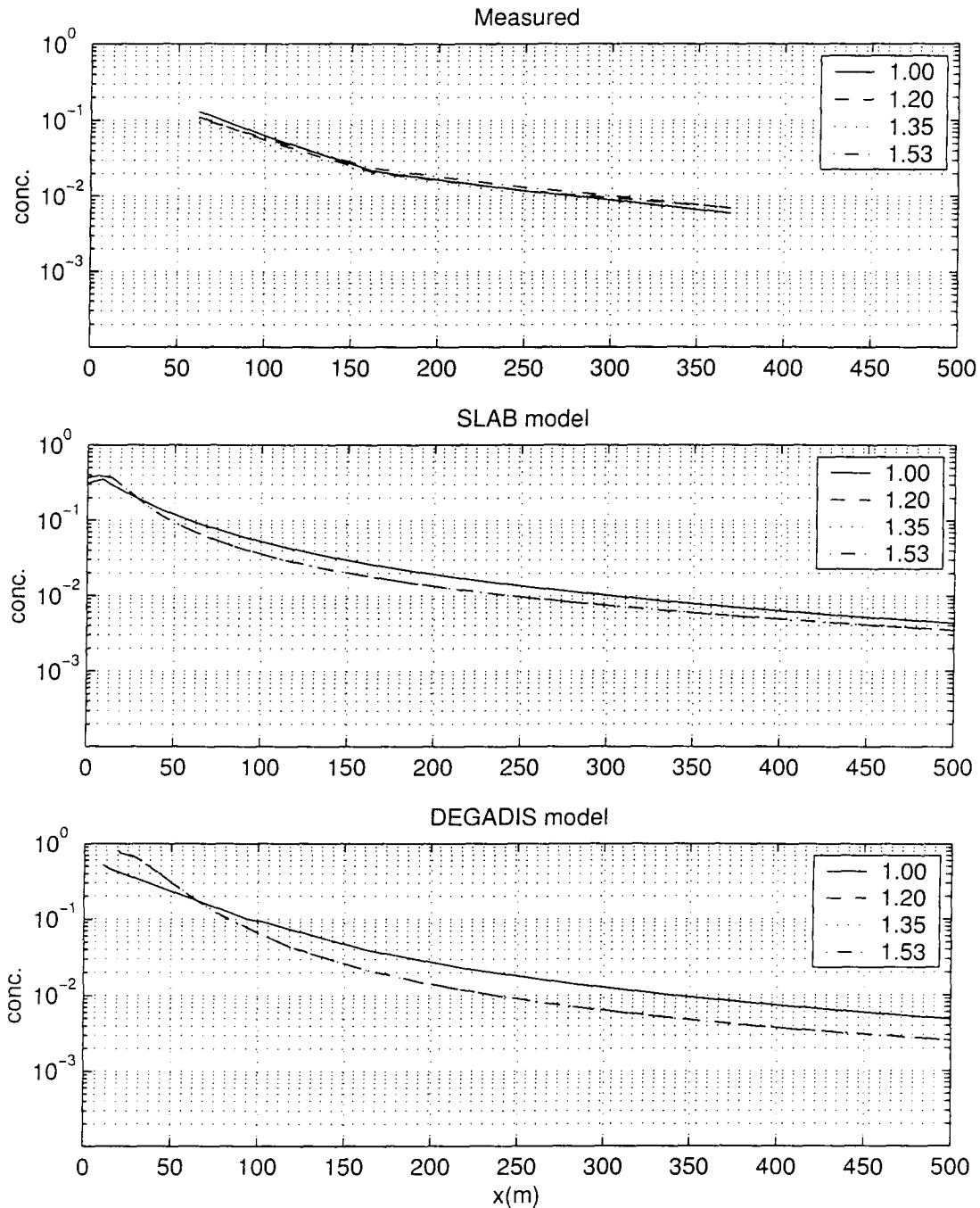


圖 5.4.5 粗糙度為 0.1m 時，平坦地形地區，不同密度比的實驗和模式計算結果之比較

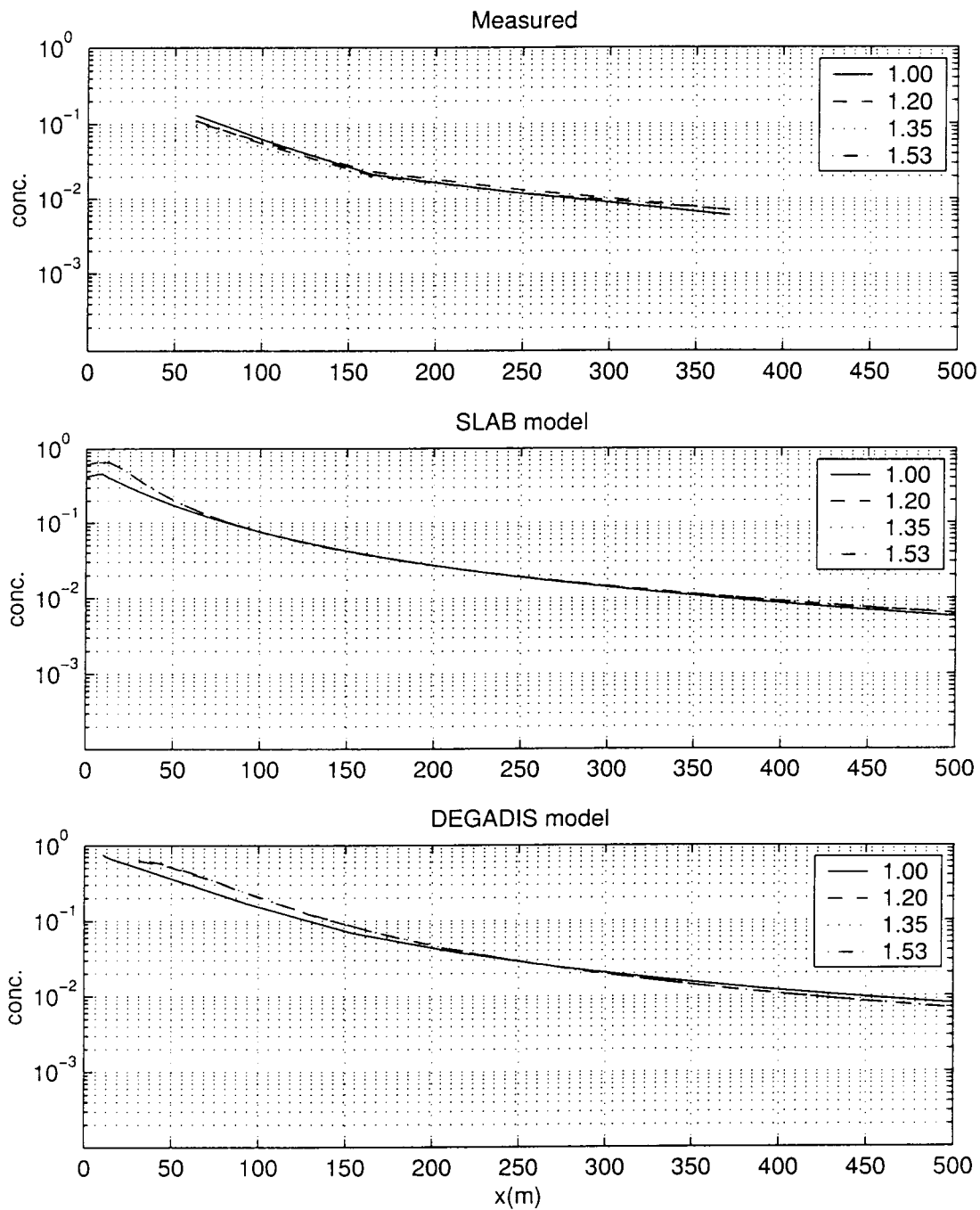


圖 5.4.6 粗糙度為 0.01m 時，平坦地形地區，不同密度比的實驗和模式計算結果之比較

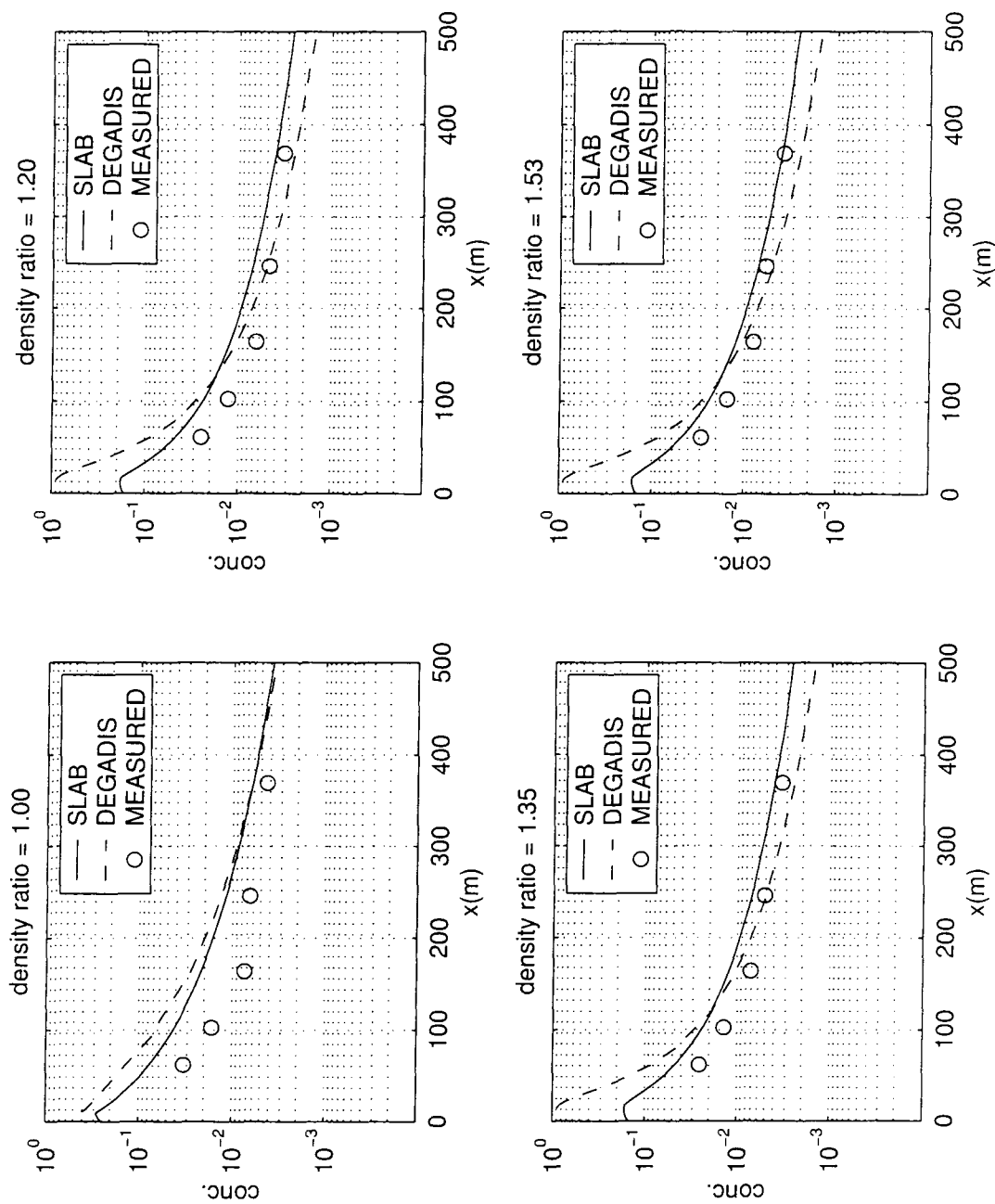


圖 5.5.1 實驗時有方塊，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.3m，  
風洞實驗結果和模式模擬值之比較

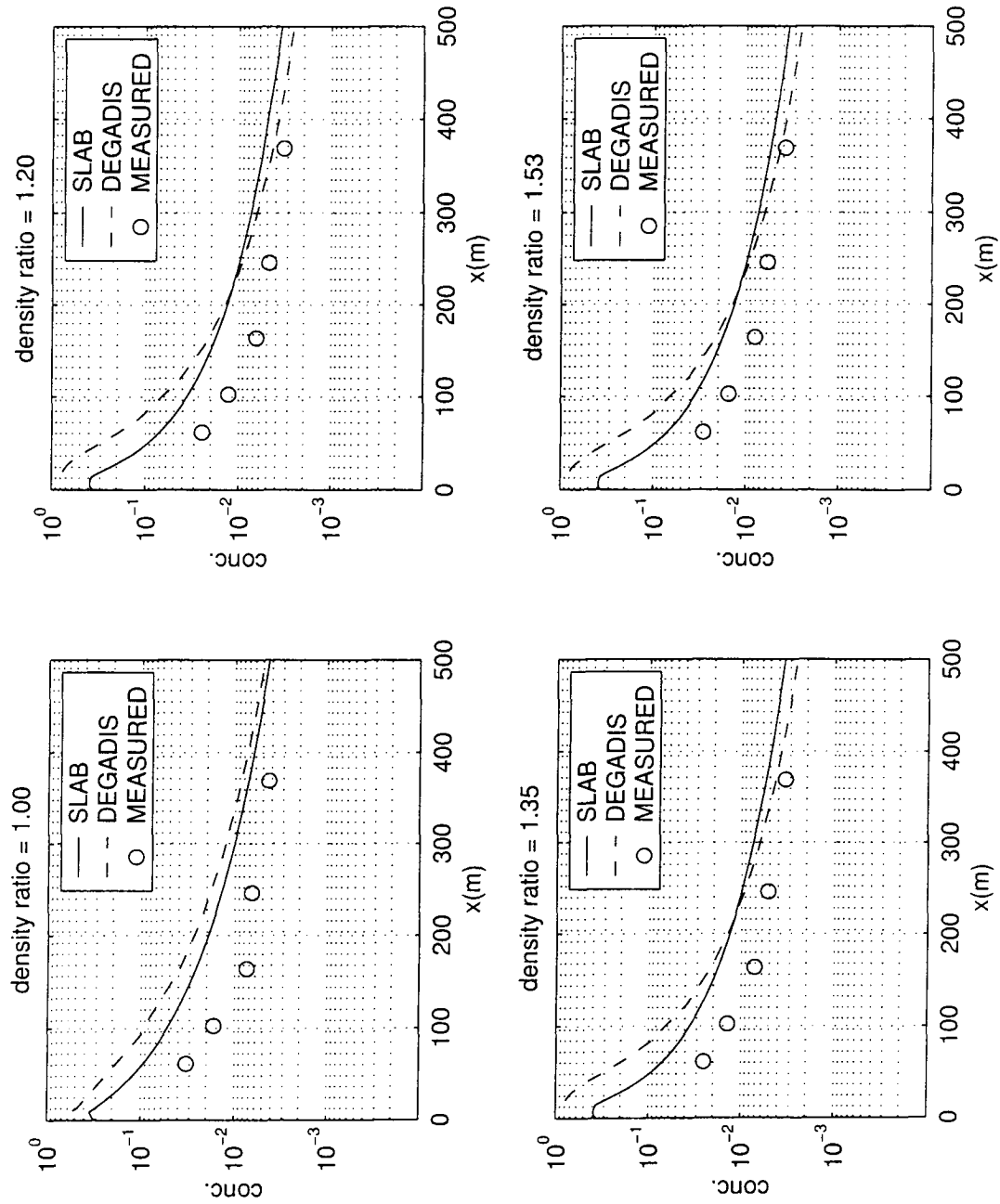


圖 5.5.2 實驗時有方塊，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.1m，  
風洞實驗結果和模式模擬值之比較

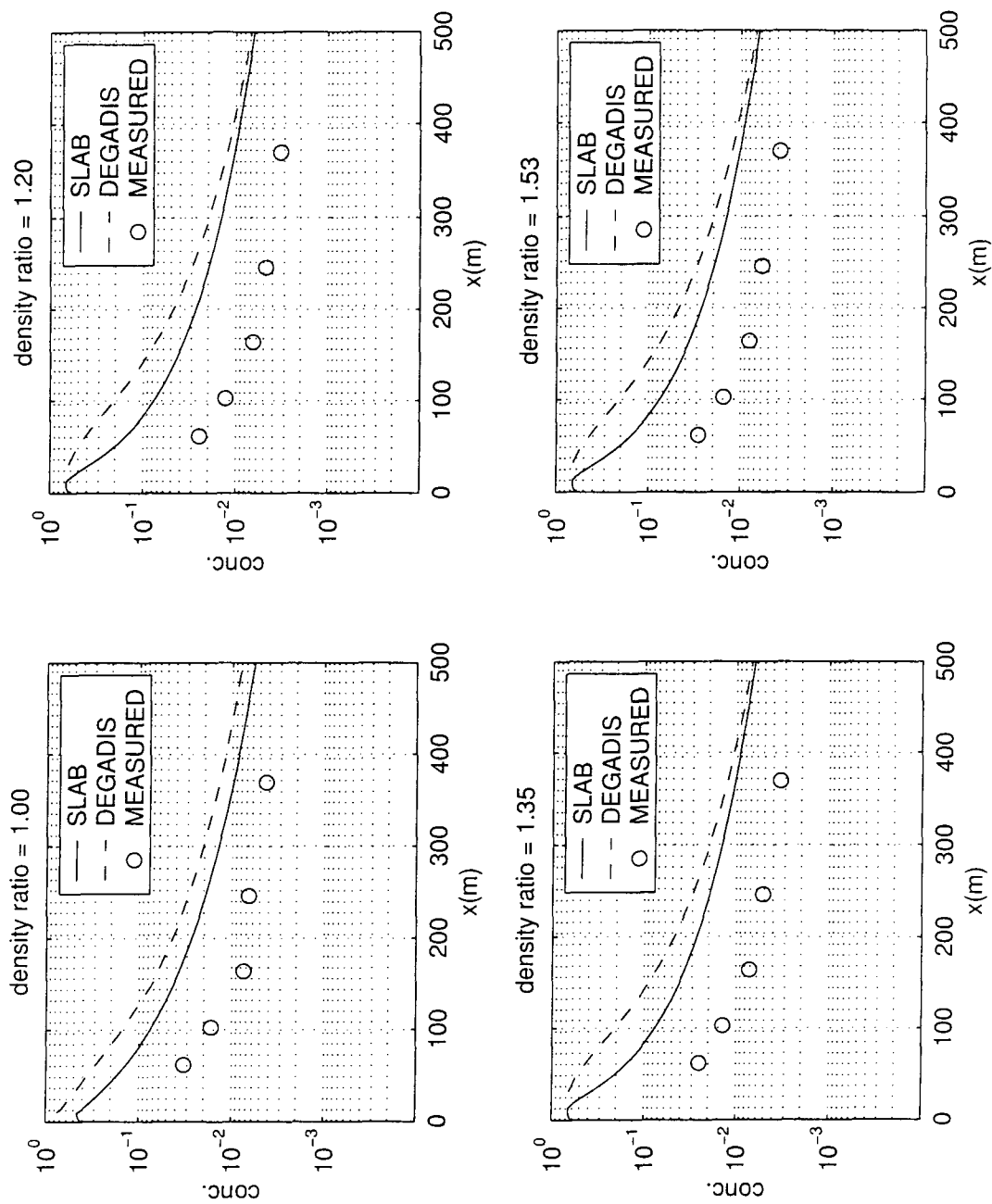


圖 5.5.3 實驗時有方塊，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.01m，  
風洞實驗結果和模式模擬值之比較



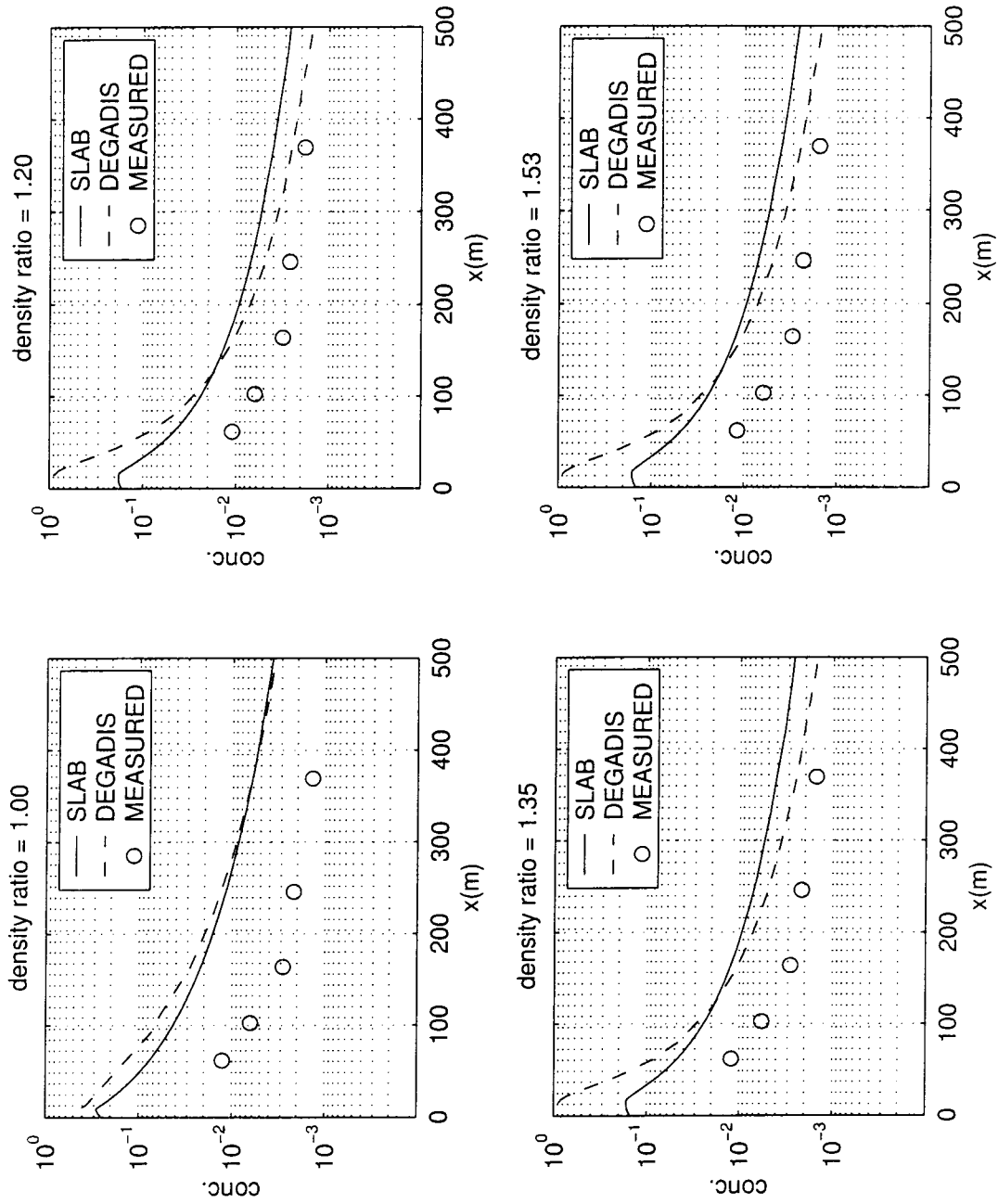


圖 5.5.4 實驗時有山脊，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.3m，  
風洞實驗結果和模式模擬值之比較

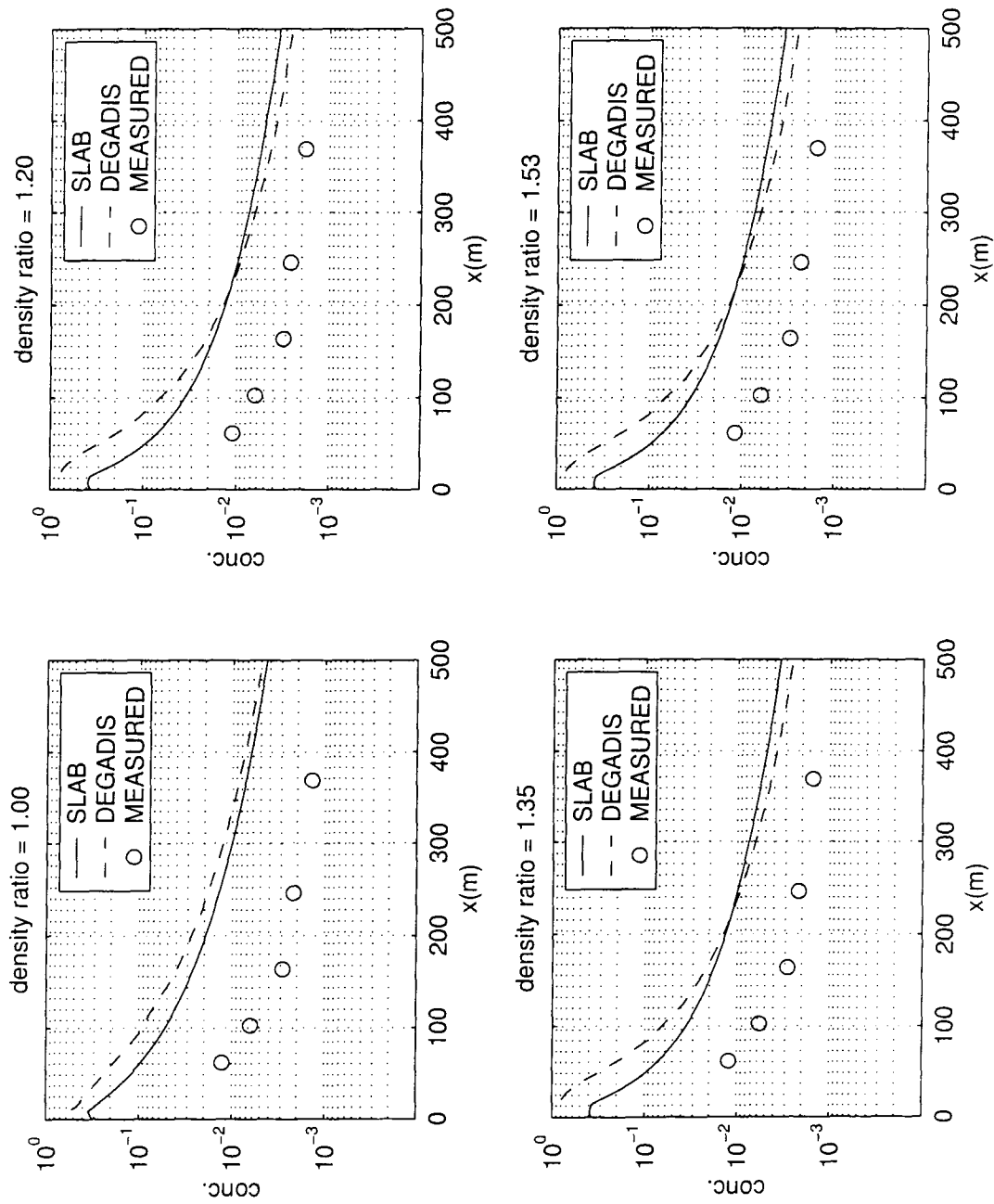


圖 5.5.5 實驗時有山脊，模式模擬時假設地面粗糙度為  $0.1\text{m}$ ，  
風洞實驗結果和模式模擬值之比較

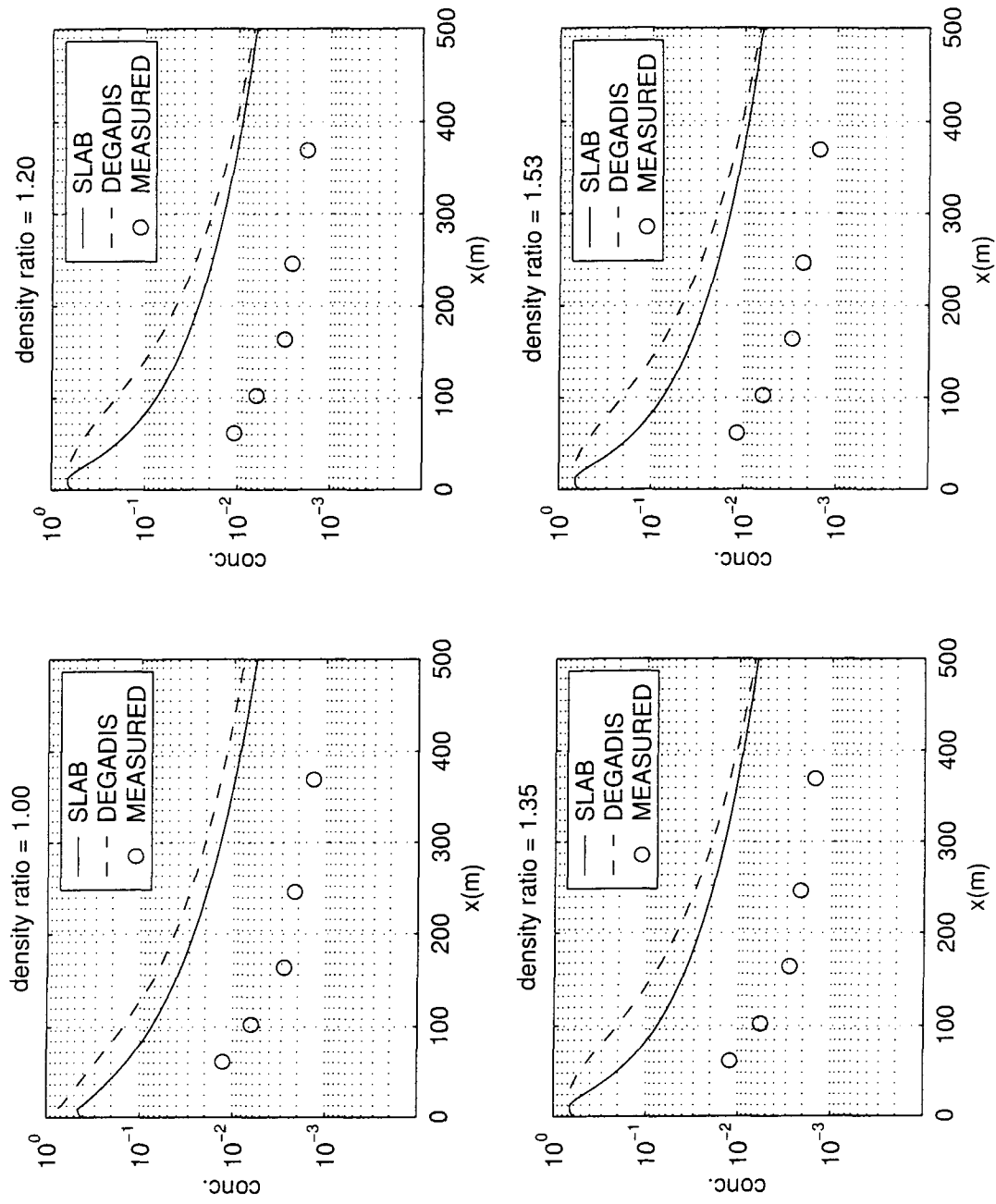


圖 5.5.6 實驗時有山脊，模式模擬時假設地面粗糙度為 0.01m  
風洞實驗結果和模式模擬值之比較

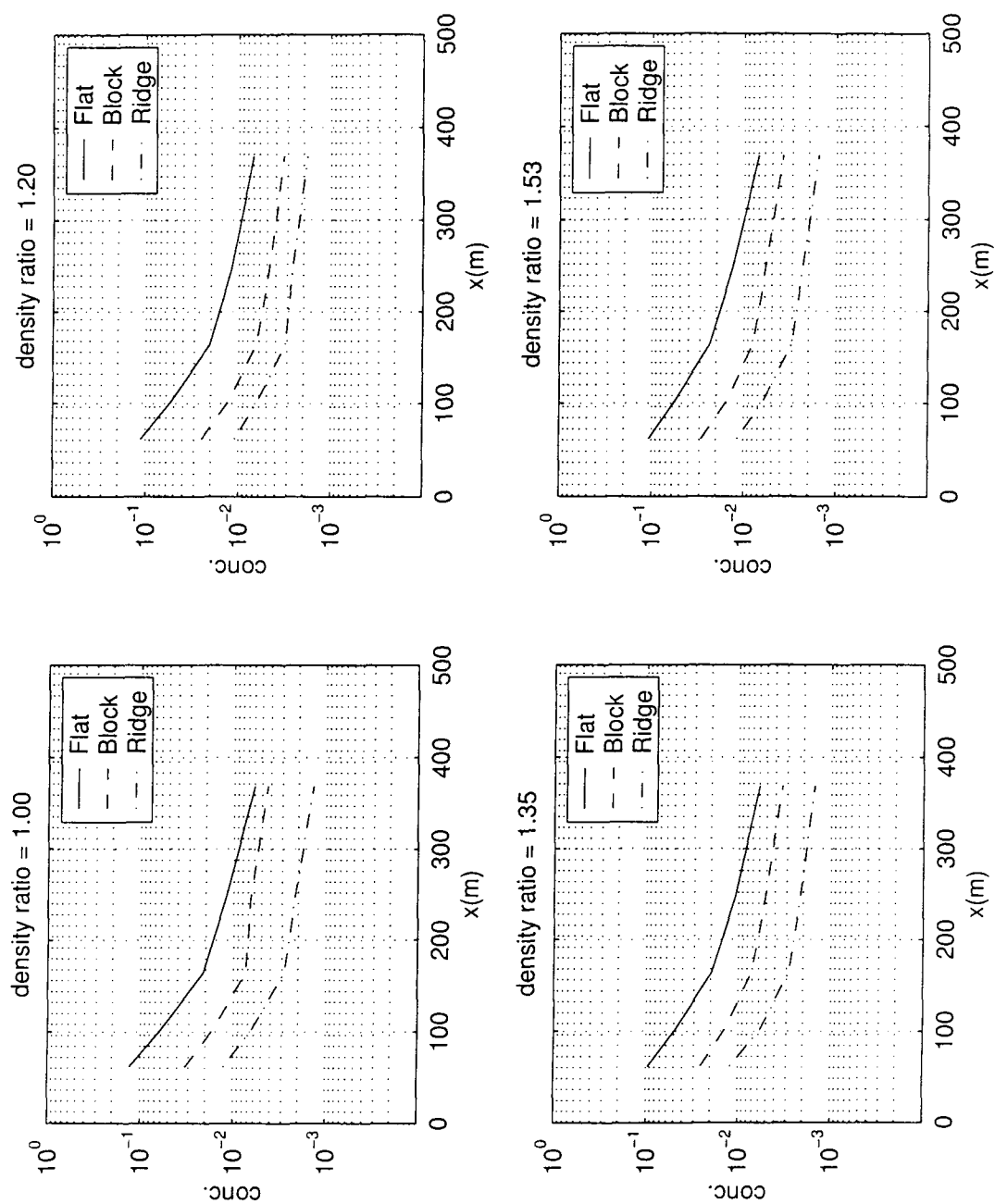


圖 5.5.7 為不同障礙物對地面中心濃度之影響

## 第六章 結果與建議

由於淡江大學之大型邊界層風洞之故，所以在進行低風速之大氣擴散物理模擬實驗時，較為外界情況所制約，這包括實驗室外部風場擾動，而造成在試驗段內之測試情況不穩定等現象，此為一般開放式環境測試風洞的共通問題。為了保證量測數據的質量，對外界之擾動有必要做嚴格的要求。本案整個測試計畫的進行過程中，就對此項要求給予特別之注意。

總體而言在物理模擬部分，所發展出來之邊界層質量極佳，在風速之量測及煙流之模擬與取樣分析之能力上亦具有很好之質量。在這個能力基礎上我們認為：

- (i) 進行地面釋放之被動源流擴散實驗時，體積通量比( $U_H/W$ )應注意保持在 20 以上，保證動量效應可忽略性。
- (ii) 在有地形尾跡影響之下的擴散行為模擬，雷諾數應保持在最低 8,000 至 10,000 以上。
- (iii) 在同一流場中進行重煙流之擴散實驗模型縮尺比例之扭曲至 30 % 擴散濃度之分佈尚無明顯的影響。

對煙源比重超過 1.5 以上之重煙流等溫模擬，由於需使用如二氯二氟代甲烷(freon-12)等較重示蹤氣體，在濃度之量測上已建立氣相層析儀就無法使用。必須改採技術要求性較高的併排之抽吸探針(hot-wire katharometer probe)之技巧。此法的一個最大優點在於除了能量測平均濃度之外亦可量測到 100Hz 之脈動濃度值。對劇毒或高爆性物質之意外排放，考慮的重點應為瞬間濃度值(尤指尖峰值)，而不能僅限於平均值，不論對基礎研究或是工程、環保問題之應用上而言。此種技術與能力的建立至為重要。

雖然本研究中，風洞實驗的地面粗糙度較過去類似實驗大許多，但是在平坦地形地區 SLAB 和 DEGADIS 之計算值與風洞實驗結果相當吻合；顯示在平坦地形，即使地面粗糙度較大，SLAB 和 DEGADIS 仍可適用。

---

數值模擬顯示地表粗糙度及其所造成的機械亂流，對重質氣體擴散有很大的影響，如輸入不正確的粗糙度，對計算結果有很大影響。

重質氣體在離開排放源後，受重力作用，往外流動，產生較大但較薄的二次污染源，如果外界亂流強度較大，容易在邊緣產生捲增效，使中心最大濃度降低。反之，如外界亂流強度較小，則因缺乏足夠的混合，所以地面濃度會較高。此現象在風洞實驗和數值模擬均可看出。

SLAB 和 DEGADIS 模式無法考慮地形的影響，如有障礙物存在時，DEGADIS 和 SLAB 兩種模式所求出的地面煙流中心濃度明顯低估。

風洞實驗顯示不同的障礙物其影響程度不一，因此很難修改像 SLAB 或 DEGADIS 這種簡單的模式讓其適用於複雜地形地區。這種簡單的模式雖然無法準確地求出雜地形地區的擴散，但其計算結果較為保守，可供作初步的評估；如果須要準確的模擬可能須要利用三維數值模式，此有待未來進一步的研究。

## 參考文獻

- (1) American National Standard A58.1-1982 Minimum American National Standard Institute, Inc., New York.
- (2) Ayrault, M., Balint, J-L, & Morel, R. 1991 Experimental study on the evolution and dispersion of a cloud of gas heavier than air. *J. of Hazardous Materials*, 26, 1-26.
- (3) Ayrault, M., Simoens, S., & Mejean, P. 1998 Negative buoyancy effects on the dispersion of continuous gas plumes downwind solid obstacles. *J. of Hazardous Materials*, 57, 79-103
- (4) Boyle, G.J. & Kneebone, A. 1973 Laboratory investigation into the characteristics of LNG spills on water, evaporation, spreading and vapor dispersion, Shell Research Ltd., Report to American Petroleum Institute, March.
- (5) Cermek, J. E. 1971 Laboratory simulation of the atmospheric boundary layer. *AIAA J.* vol. 9, No. 9, pp.1746-1754.
- (6) Chan, S.T. 1988 FEM3A - A finite element model for the simulation of gas transport and dispersion : User's Manual, UCRL-21043, LLNL, Livermore, CA.
- (7) Chan, S.T. 1992 Numerical simulations of LNG vapor dispersion from a fenced storage area. *J. Haz. Mat.*, 30, pp. 195-224.
- (8) Chan, S.T. 1998 A three-dimensional model for simulating atmospheric dispersion of heavy-gases over complex terrain. 10<sup>th</sup> Joint Conference on the Applications of Air Pollution Meteorology with the Air and Waste Management Assoc., Phoenix, AZ.
- (9) Chan, S.T., Ermak, D.L. & Morris, L.K. 1987 FEM3 model simulations of selected Thorney Island Phase I Trials, *J. Haz. Mat.*, 16, pp. 267-292.
- (10) Counihan, J. 1975 Adiabatic atmospheric boundary layers : A review and analysis of data from the period 1880-1972. *Atm. Environ.* 9, pp. 871-905.
- (11) Davenport, A.G., 1956 The Relationship of Wind Structure to Wind Loading, *Proc. Symp. on Wind Effects on Buildings and Structures*, Vol.1, National Physical Laboratory, Teddington, U.K. Her Majesty's Stationary Office, London, p53-102.
- (12) Engineering Science Data Item 1974 Characteristics of atmospheric

- 
- turbulence near the ground. ESDU Item number 74030 and 74031.
- (13) Ermak, D.L. 1989 A methodology for evaluating heavy gas dispersion model. ESL-TR-88-37, LLNL, Livermore, CA.
  - (14) Ermak, D.L. 1990 User's Manual for SLAB: An Atmospheric Dispersion Model for Denser-Than-Air Releases, NTIS DE91-008443.
  - (15) Ermak, D.L., Chapman, R., Goldwire, H.C., Gouveia, F.J. & Rodean, H.C. 1989 Heavy gas dispersion test summary report. NTIS AD-A213088.
  - (16) Halitsky, J. 1969 Validation of scaling procedures for wind tunnel model testing of diffusion near buildings. Geophysical Sciences Laboratory, Report No. TR-69-8, N.Y. University, New York.
  - (17) Hall, D.J. 1977 Further experiments on a model of an escape of heavy gas. Warren Springs Laboratory Report CR 1341(AP), Department of Industry, U.K.Christchurch, New Zealand, Vol. 1 & 2, 558p.
  - (18) Hanna, S.R., Strimaitis, D.G. & Chang, J.C., 1991 Evaluation of fourteen hazardous gas models with ammonia and hydrogen fluoride field data. J. Haz. Mat., pp.127-158.
  - (19) Hartwig, S. 1983 Open and controversial topics in heavy gas dispersion and related risk assessment in Heavy Gas and Risk Assessment II, ed. Hartwig, D. Reidel Publish Co.
  - (20) Havens, J., Walker, H., & Spicer, T. 1994 Wind-tunnel data sets for complex dispersion model evaluation. J. of Loss Prevention in the Process Industries, 7, 106-117.
  - (21) Hoot, T.G., Meroney, R.N. & Peterka, J.A. 1974 Wind tunnel tests of negatively buoyant plumes. FDDL Report CER73-74TGH-RNM-JAP-13, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, October.
  - (22) Hoot, T.G. & Meroney, R.N. 1973 The behavior of negatively buoyant stack gases. 67<sup>th</sup> Ann. Meet Air Pollution Control Assoc., Denver, CO, June 9-13, pap. No. 74-210.
  - (23) Hunt, J. C. R & Femholz, H. 1975 Wind-tunnel simulation of the atmospheric boundary layer : a report on Euromech 50. J. F. M. 70, pt.3. pp.543-559.
-



- 
- (24) Isyumov, N. & Tanaka, H. 1979 Wind tunnel modeling of stack gas dispersion- Difficulties and Approximations. Proc. of the 5<sup>th</sup> Int. Wind Eng. Conf., Colorado state University, Fort Collins, Colorado, PP. 987-1002.
  - (25) Kaimal , J.C. , Wyngaard , J.C. , Izumi , Y. & Cote , O.R. 1972 Spectral characteristics of surface-layer turbulence. Quart J. Roy. Met. Soc ., **98** , pp. 563-589.
  - (26) Krogstad, P.A. & Jacobsen, O. 1989 Dispersion of heavy gas. In Encyclopedia of Environ-mental Control Technology, vol. 2, pp. 631-678.
  - (27) Krogstad, P.A. & Pettersen, R.M. 1986 Wind tunnel modeling of a release of a heavy gas near a building, Atmos. Environ., **20**, pp. 867-878.
  - (28) Meroney, R.N. & Neff, D.E. 1982 Dispersion of vapor from liquid natural gas spills – evaluation of simulation in a meteorological wind tunnel: five-cubic-meter China Lake spill series. J. of Wind Engr. & Indus. Aero., **10**, pp1-19.
  - (29) Meroney, R.N. 1979 Physical modeling of atmospheric dispersion of heavy gases released at the ground or from short stacks. Proc. 10<sup>th</sup> Int. Tech. Meet. On Air Pollution Modeling and Its Applications, Rome, October 23-26, pp 689-699.
  - (30) Meroney, R.N. 1987 Guideline for fluid modeling of dense gas cloud dispersion, J. of Hazardous Materials, **17**, 23-46.
  - (31) Meroney, R.N., Neff, D.E., Cermak, J.E. & Megahed, M. 1976 Dispersion of vapor from LNG spills –simulation in a meteorological wind tunnel. CER76-77RNM-JEC-MM57, Colorado State University, Fort Collins, CO.
  - (32) Neff, D.E. 1989 Physical modeling of heavy phame dispersion. Ph. D. Dissertation, Department of Civil Engineering, Colorado State University, Fort Collins, Colorado.
  - (33) Neff, D.E. , Meroney, R.N. & Cermak, J.E. 1976 Wind tunnel study of the negatively buoyant plume due to an LNG spill, CER76-77DEN-RNM-JEC22, Colorado State University, Fort Collins, CO.
  - (34) Pasquill, F. 1974 Atmospheric Diffusion D. von Nostrand Co. 4299.
  - (35) Puttock, J.S. 1986 Comparison of Thorney Island data with prediction of HEGABOX/ HEGADAS, 2<sup>nd</sup> Symposium on Heavy Gas Dispersion Trials at Thorney Island, Sheffield, Sept.
-

- 
- (36) Raine , J.K. 1974 Modeling natural wind : Wind protection by fences. Ph.D. Dissertation , Department of Mechanical engineering U of Canterbury , Christchurch , New Zealand , Vol. 1 & 2 , 558p.1.Pasquill, F. 1974 Atmospheric Diffusion D. von Nostrand Co. 4299.
  - (37) Roberts, P.T. & Hall, D.J. 1994 Wind-tunnel simulation. Boundary layer effects in dense gas dispersion experiments. J. of Loss Prevention in the Process Industries, 7, 106-117.
  - (38) Sakagami, J. & Kato, M. 1968 Diffusion and vapor rise of methane vapor from a real source in air stream. Nat. Sci. Rep., Ochanomiza University, Japan, 19(2).
  - (39) Skinner , G.T. & Ludwig , G.R. 1978 Physical modeling of dispersion in the atmospheric boundary layer. Calspan Advanced Technology Center , Calspan Report No. 201 , May.
  - (40) Snyder W.H. 1981 Guideline for fluid modeling of atmospheric EPA 600/8-81-009 .
  - (41) Spicer T. & Havens J. 1989 User's Guide for the DEGADIS 2.1 Dense Gas Dispersion Model, EPA-450/4-89-019, November .
  - (42) Zhu, G-w., Arya, S.P., & Synder, W.H., 1998 An experimental study of the flow structure within a dense gas plume. J. of Hazardous Materials, 62, 161-186
  - (43) Cermak, J. E., 1975, Application of fluid mechanics to wind engineering, A Freeman Scholar Lecture. ASME J. of Fluids Engng., 97, No1, pp.9-38.
  - (44) Kline, S. J., 1965, Similitude and Approximation Theory. McGraw-Hill. 229p.
  - (45) .Lumley, J. L. & Panofsky, H.A. 1964, The structure of atmospheric turbulence. Interscience, N. Y., N. Y., 239p.
  - (46) .Hinze, J. O. 1975, Turbulence, McGraw-Hill, 790p.
  - (47) .Schlichting, H. 1968, Boundary Layer Theory, McGraw-Hill, New York.
  - (48) .Carl, D. M., Tarbell, T. C. & Panofsky, H. A. 1972, Profiles of wind and temperature from towers over homogeneous terrain, J. Atmos. Sci., 30, pp.788-794.
  - (49) Janssen, L. A. M. 1981, Wind tunnel modeling of the dispersion of LNG vapor in the atmospheric boundary layers, TNO Ref. nr.:81-07020, File nr.:8710-13770, Apeldoorn, Necherlands, Jane.
-

- 
- (50) Neff, D. E. & Meroney, R. N. 1981, The behavior of LNG vapor Clouds: wind-tunnel simulations of 40m<sup>3</sup> LNG spill tests at China Lake Naval Weapons Center, California, Colorado State University Report CER81-82NEN-RNMI for Gas Research Institute, GRI Report NO. 80/0094.
  - (51) Davenport, A. G & Isyumov, N. 1967, The application of the boundary layer wind tunnel to the prediction of wind loading, Proceedings of International Research Seminar, Wind Effects on Buildings and Structures, pp.210-230.
  - (52) Cermak, J. E & Arya, S.P.S 1970, Problems of atmospheric shear flow and their laboratory simulation, Boundary Layer Meteorology, 1. pp.40-60.
  - (53) TSI Incorporated, 1997, IFA300 Constant Temperature Anemometer System Instruction Manual, May.
  - (54) Davenport, A.G 1963, The relationship of wind structure to wind loading. Paper 2, Proceed, Conf. on Wind Effects on Bldgs and Structures, NPL, June, HMSO, London, 1965, pp.54-102.
  - (55) Counihan, J. 1975, Adiabatic atmospheric boundary layers: A review and analysis of data from the period 1880-1972, Atmos, Environ., 9, no.10, pp.871-905.
  - (56) ESDU 1976 Characteristics of atmospheric turbulence near the ground. Engineering Sciences Data Item No.75001.
  - (57) Gifford, F. A. Jr 1968, An outline of theories of diffusion in the lower of the atmosphere. Meteorology and Atomic Energy(1968), pp.66-116. D.H. Slade(ed.), USAEC Report TID-24190, U.S. Atomic Energy Commission, NTIS.
  - (58) Neff, D. E & Meroney, R.N 1979, Dispersion of vapor from LNG spills – Simulation in a Meteorological wind funnel of spill at China Lake Naval Weapons Center, California. FDDL Report CER78-79DEN-RNM41, Colorado State University, Fort Collins, Colorado, March.
  - (59) 江旭程(1994) 意外事件氣體擴散模式，八十三年度化學工業安全研討會論文集，pp. 117-126
  - (60) 高振山、李全(1994) 儲槽外洩擴散後果之案例分析：電腦擴散模擬軟體之應用，第一屆化學災害預防技術研討會論文集，pp. 4-19，新竹市
  - (61) 高振山、李全(1994)有害氣體擴散模擬軟體使用之比較及準確性之評估，第
-

一屆化學災害預防技術研討會論文集，pp. 4-75，新竹市

- (62) 張乃彬、曾政傑、魏憶琳(1996)三維毒物擴散模式與地理資訊系統之結合分析，第十三屆空氣污染控制技術研討會論文專輯，pp. 941-946, 台北市

# 附 錄 A

# A10B

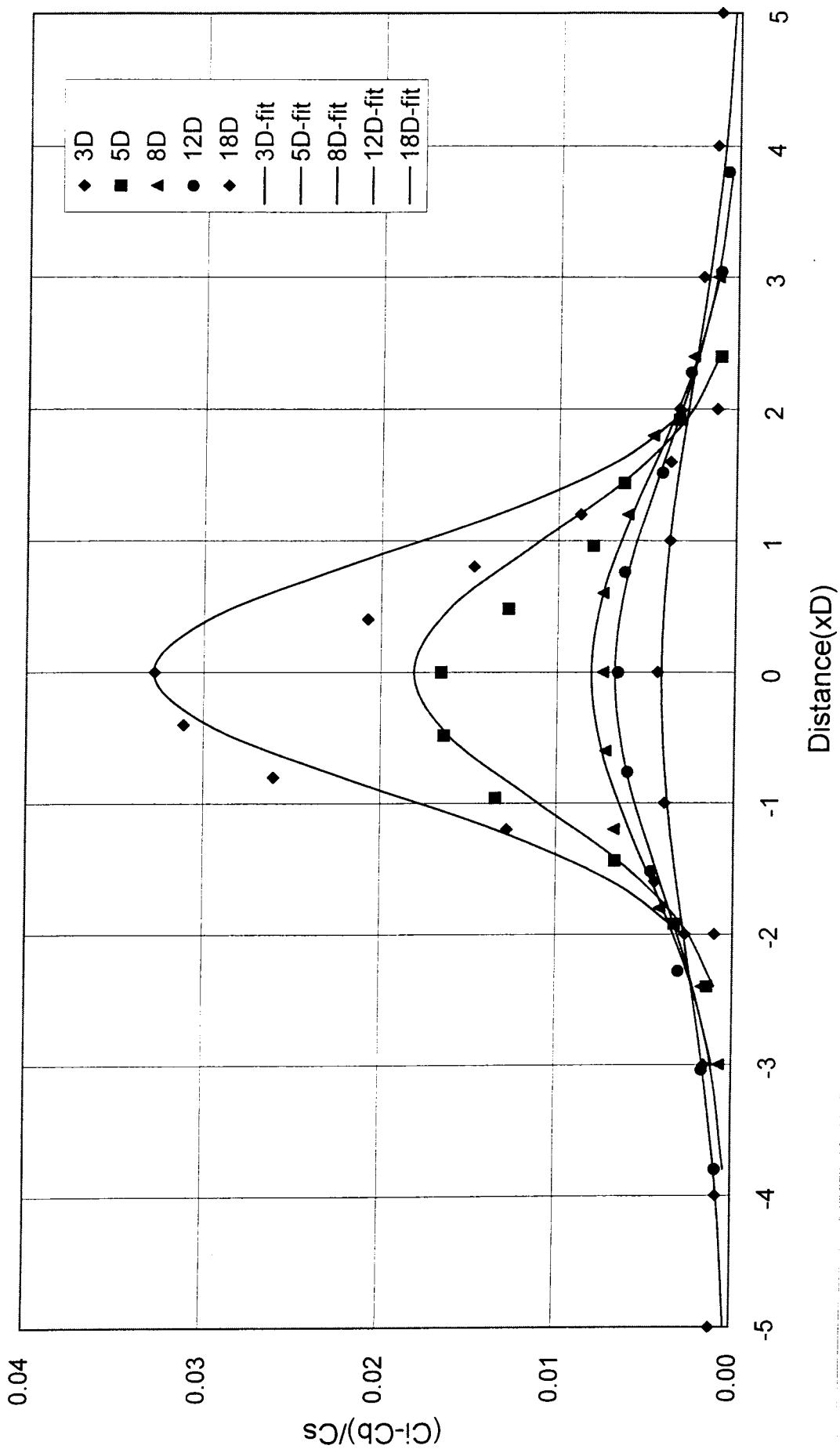


圖 A-1 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.0$ )

# A10F

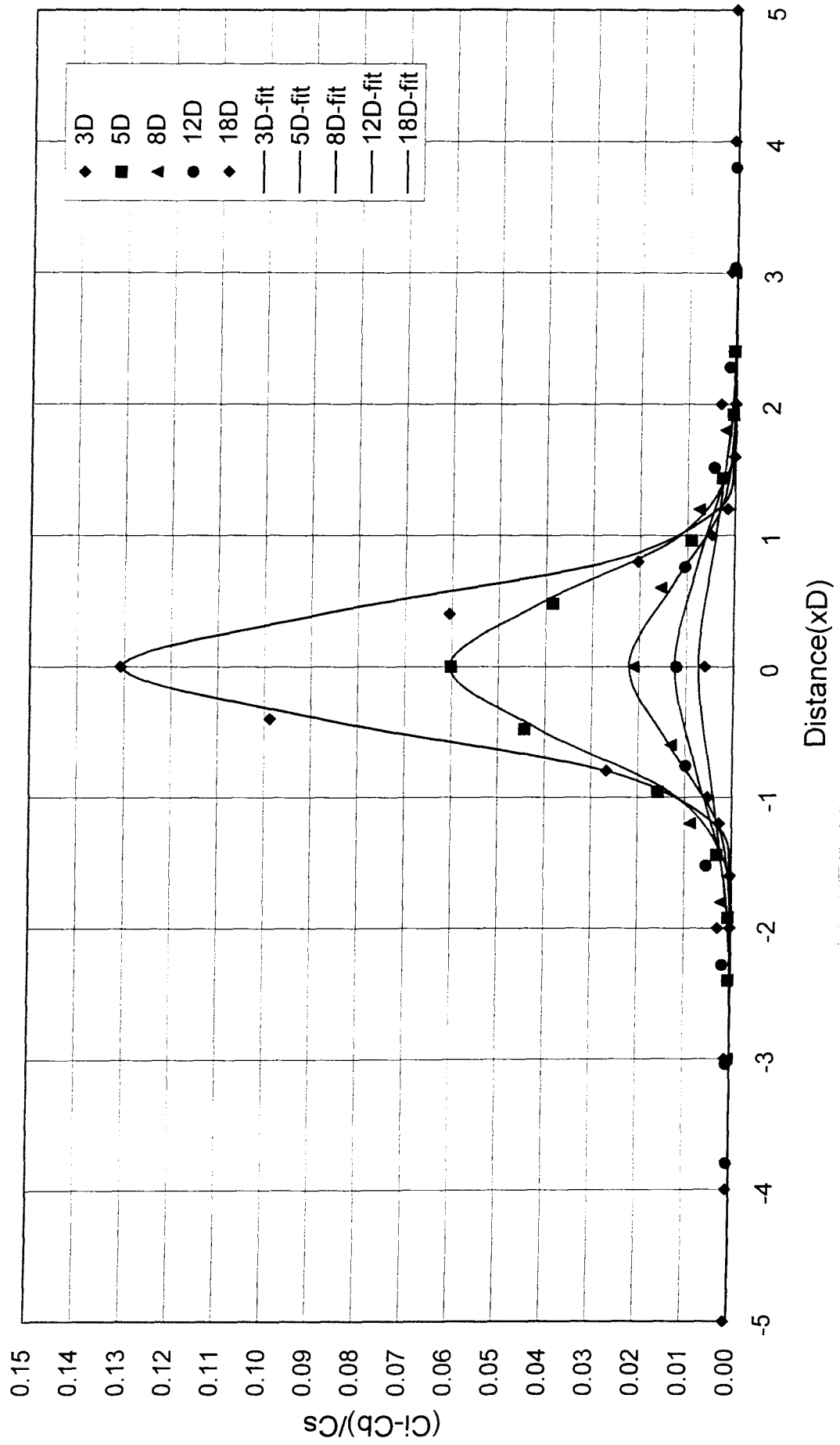


圖 A-2 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.0$ )

# A10M

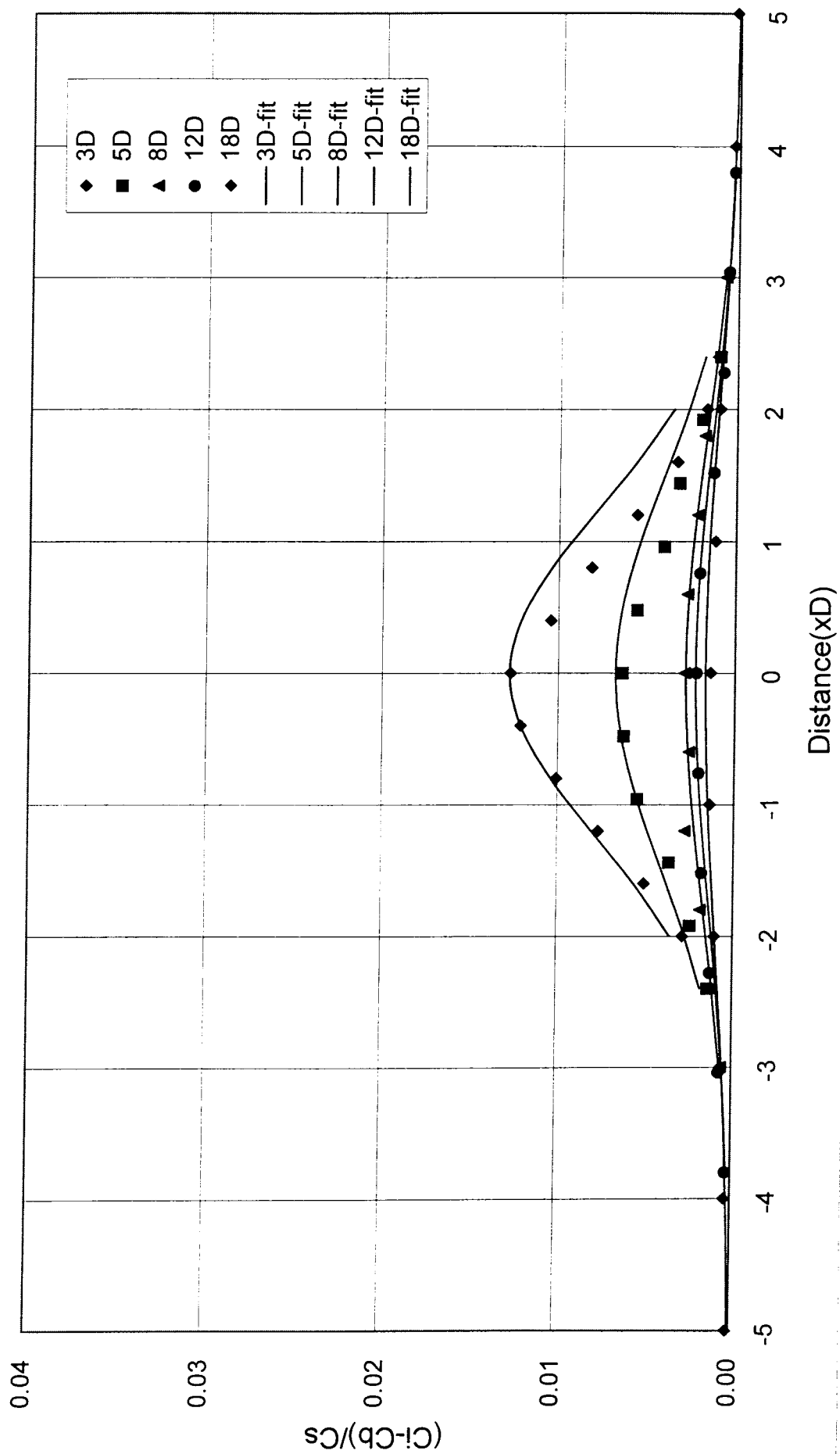


圖 A-3 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.0$ )



# A12B

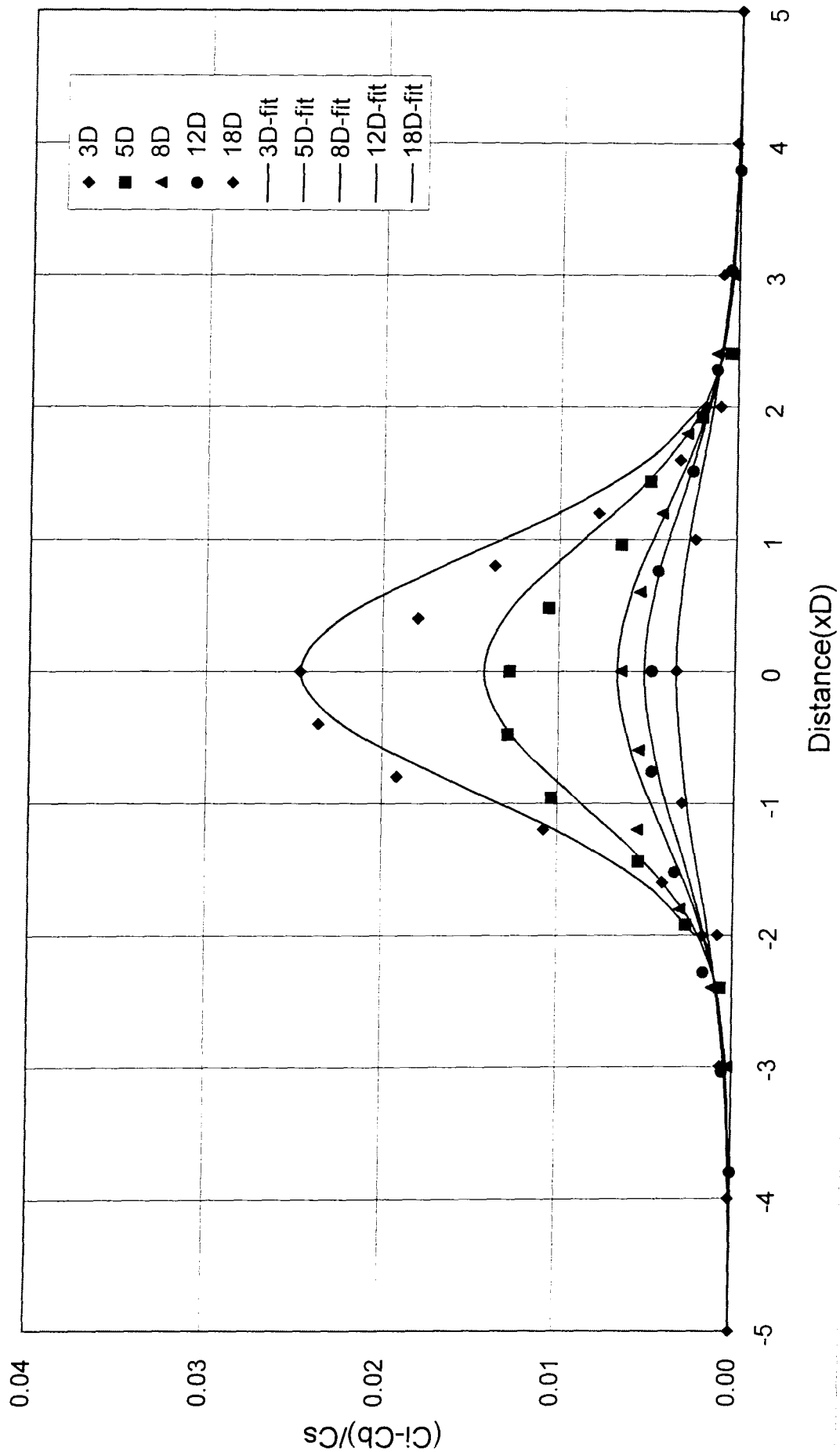


圖 A-4 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.2$ )

# A12F

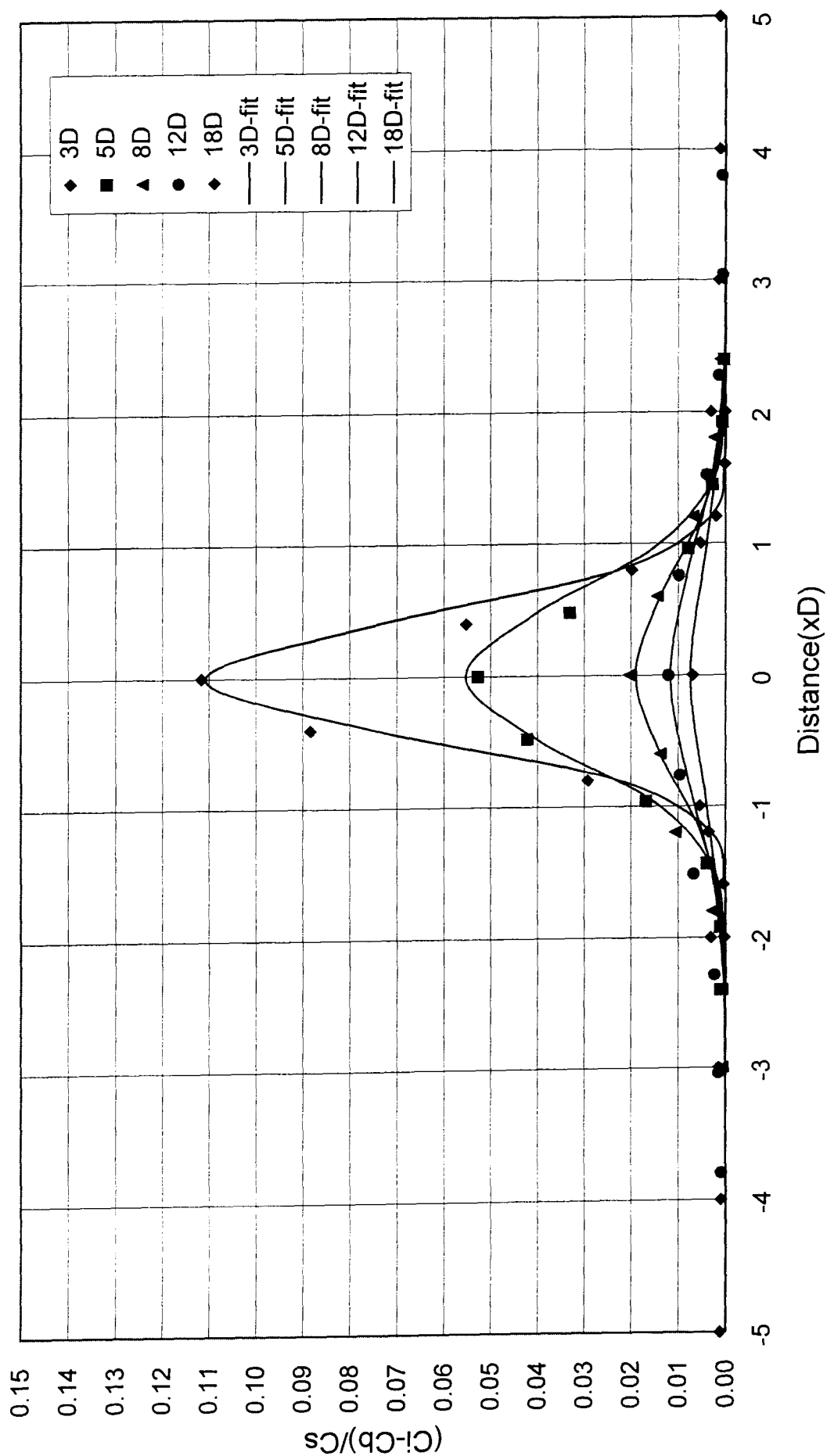


圖 A-5 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.2$ )

# A12M

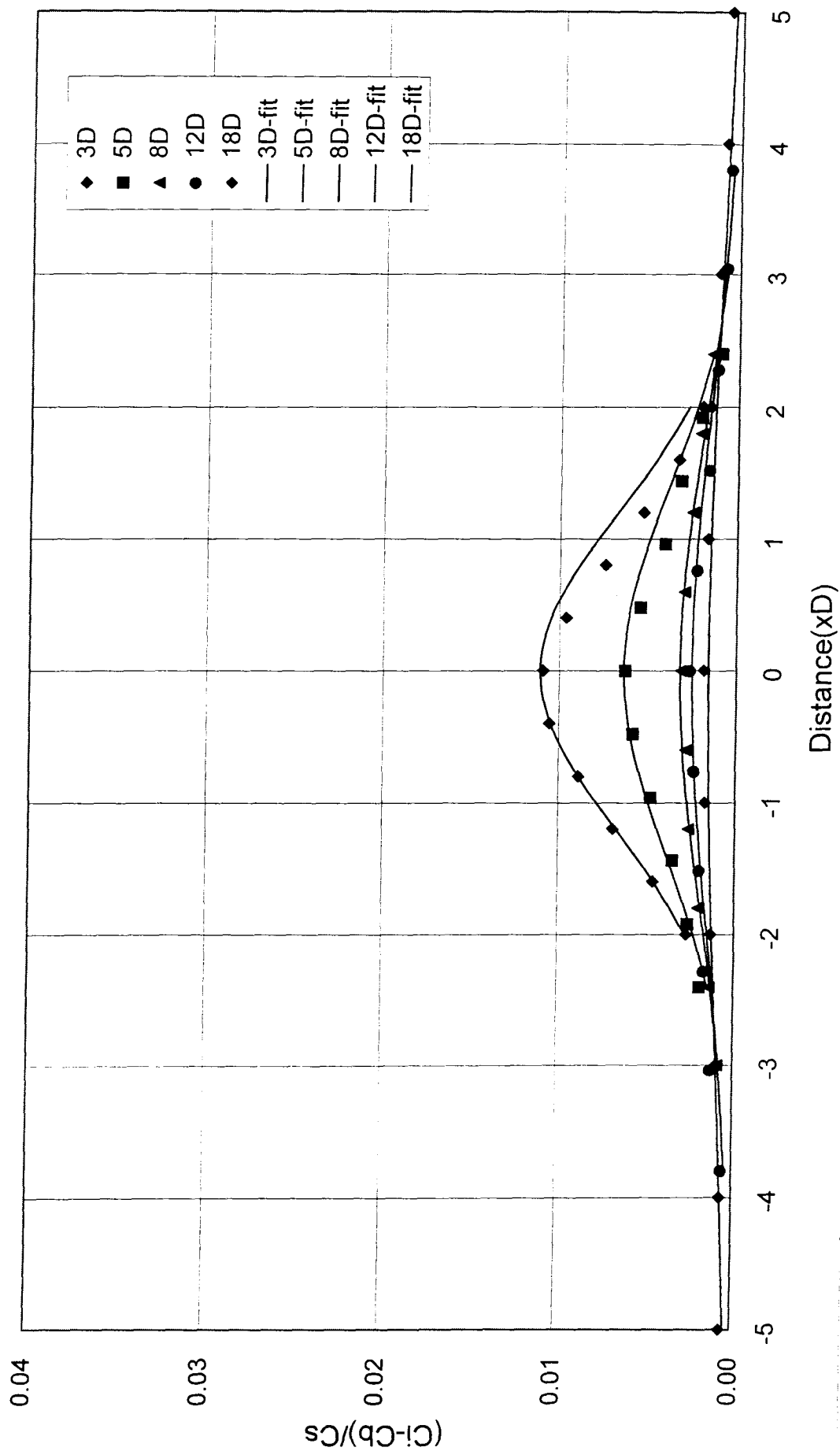


圖 A-6 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.2$ )

# A13B

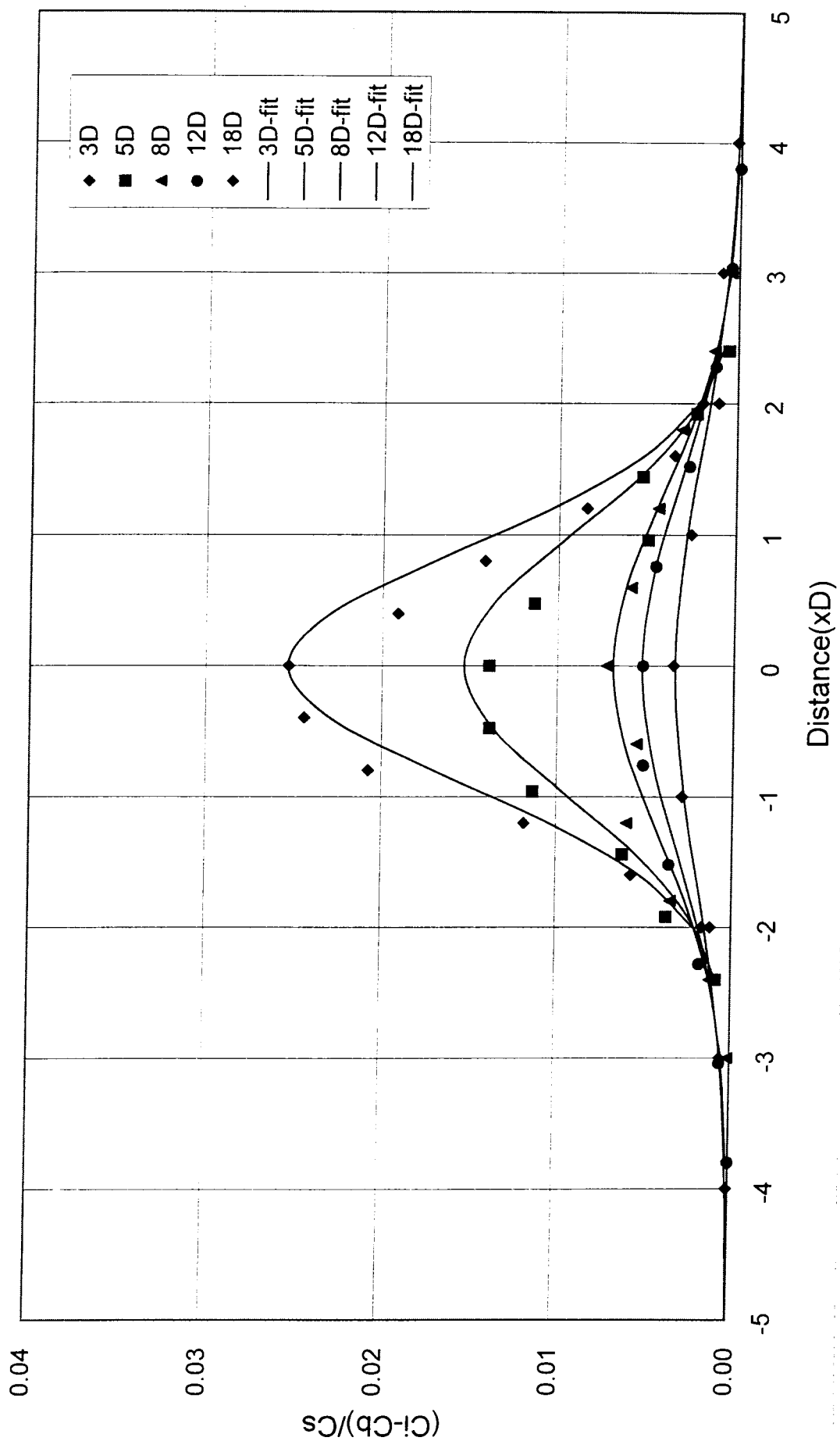


圖 A-7 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.35$ )

# A13F

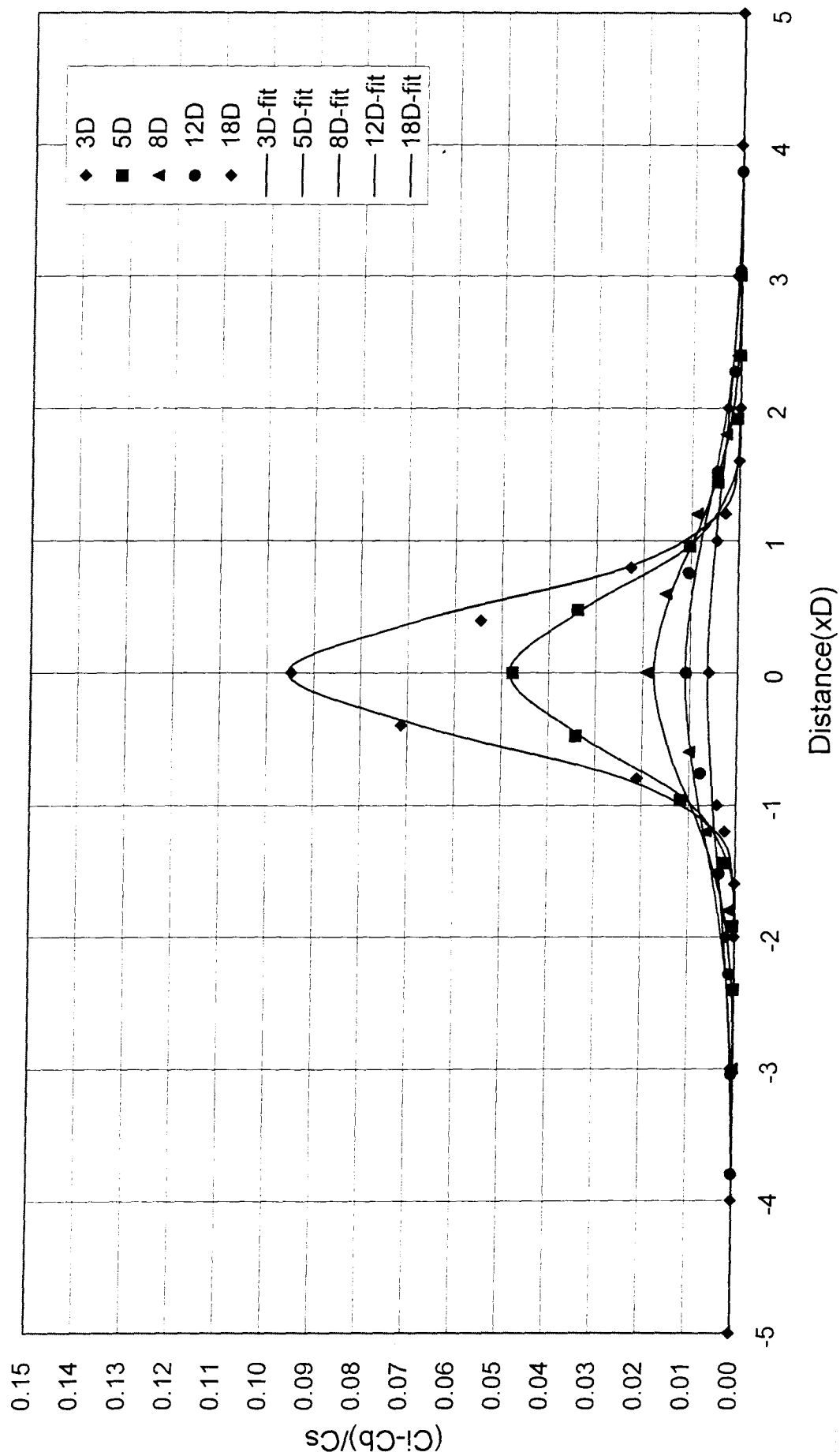


圖 A-8 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.35$ )

# A13M

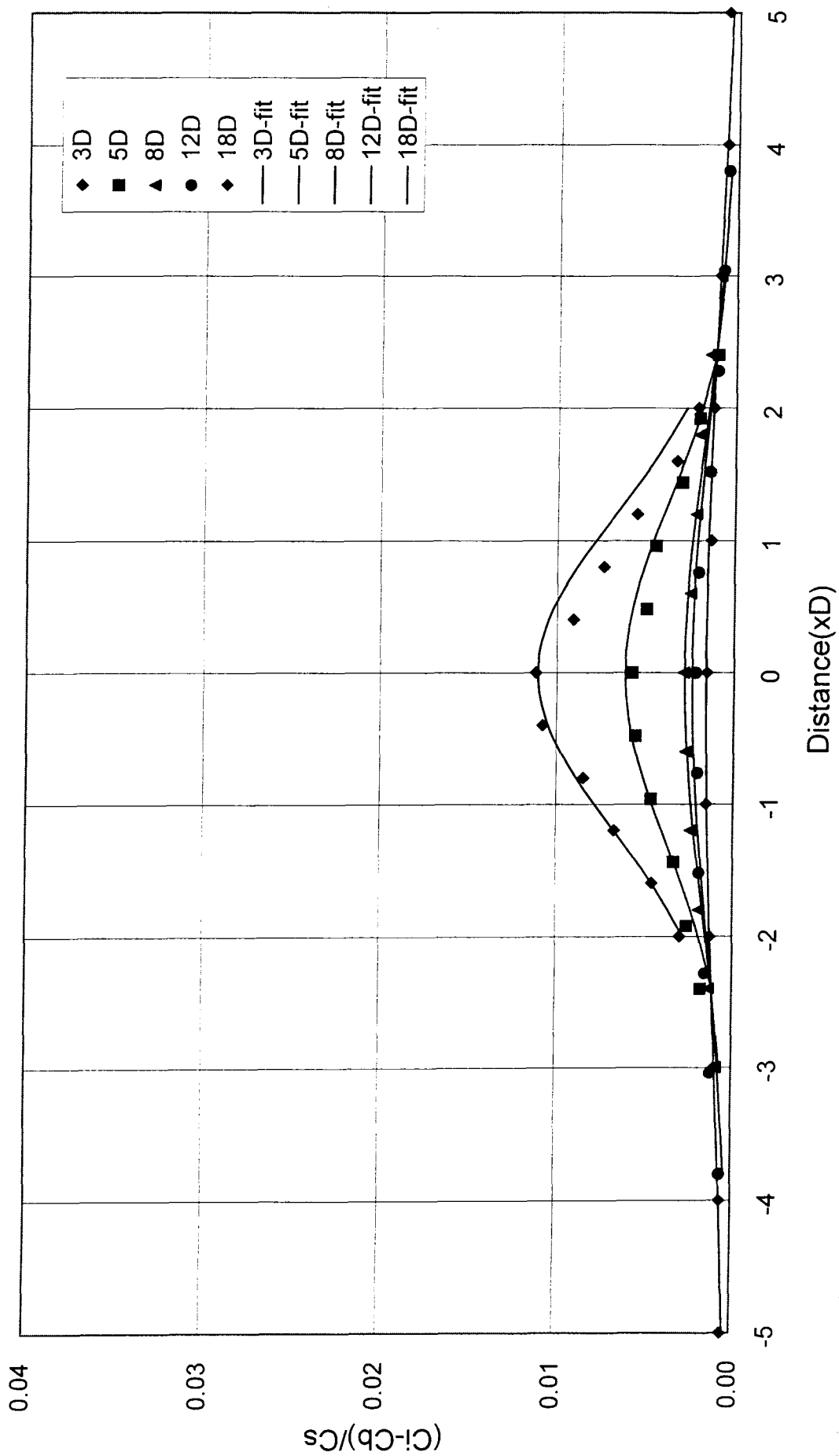


圖 A-9 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.35$ )

# A15B

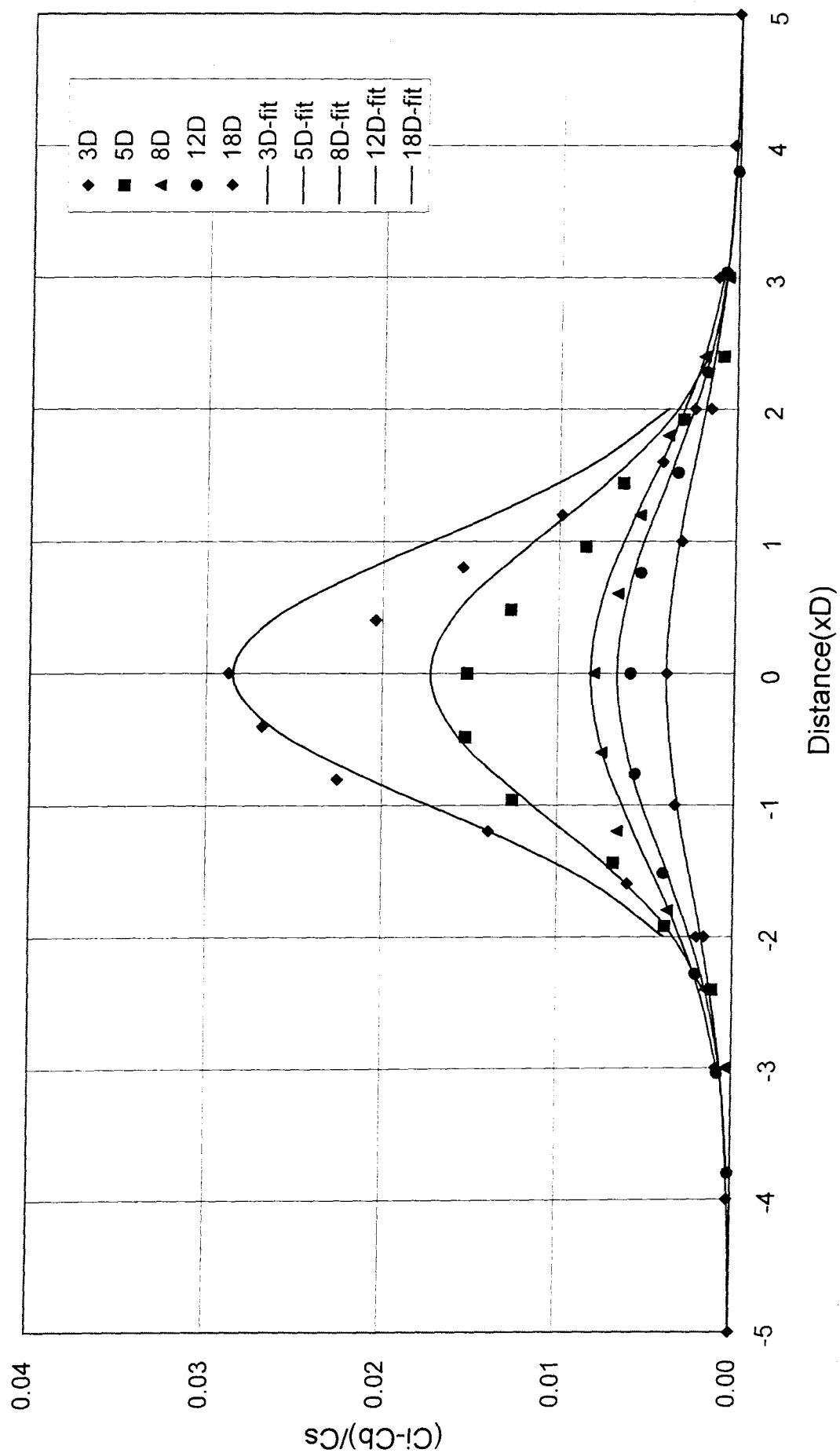


圖 A-10 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.53$ )

# A15F

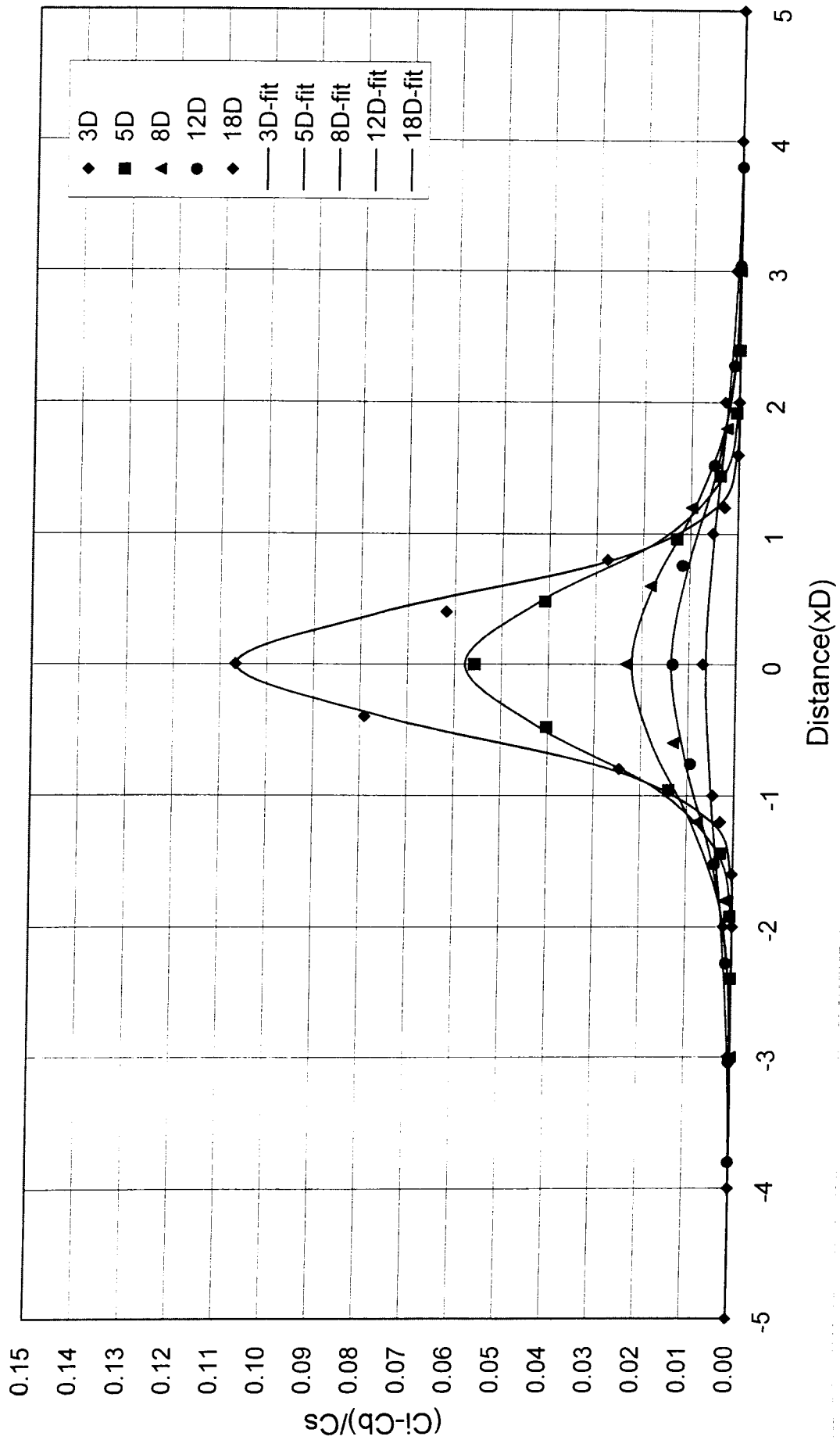


圖 A-11 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.53$ )



# A15M

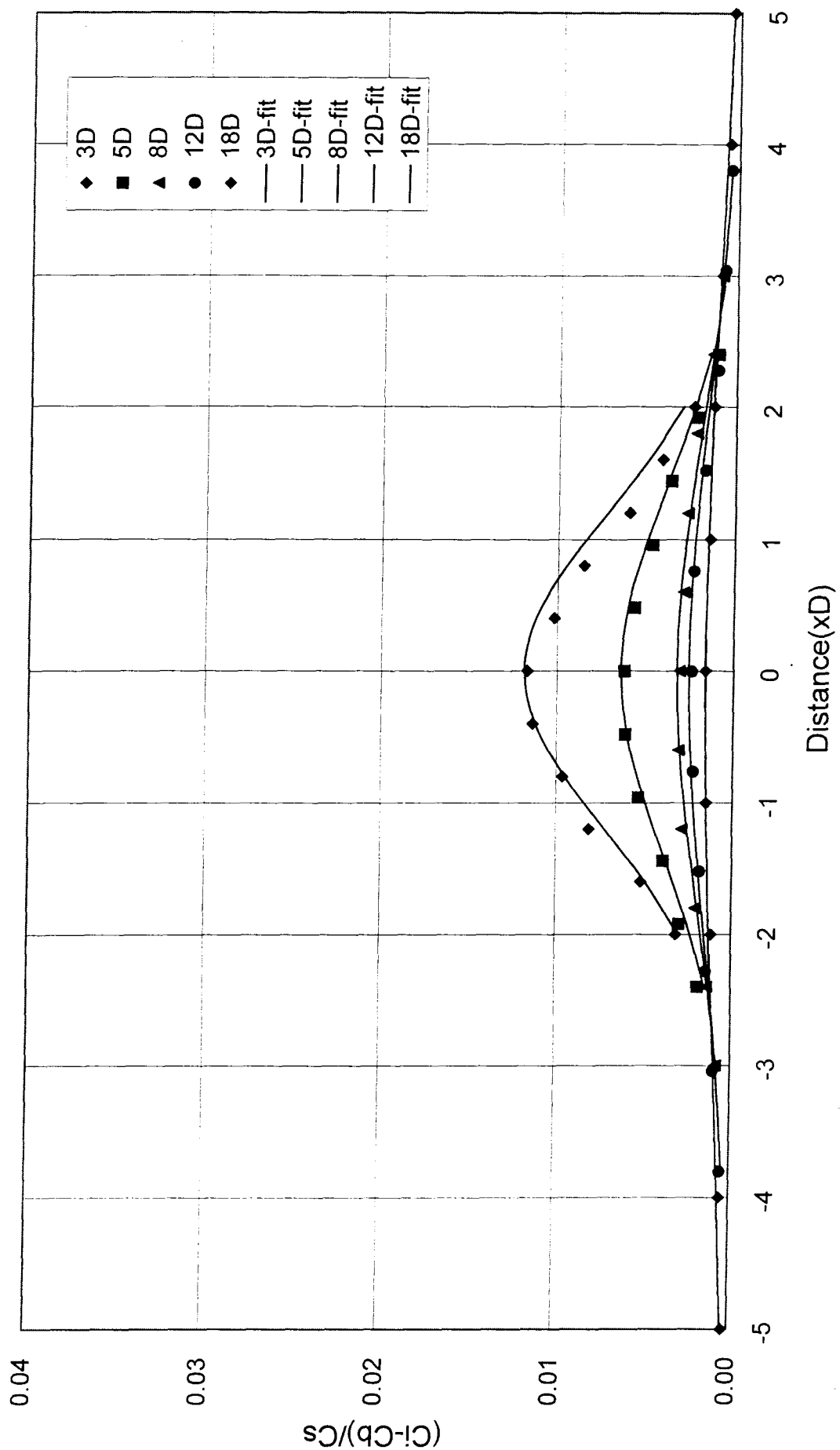


圖 A-12 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.53$ )

# B10B

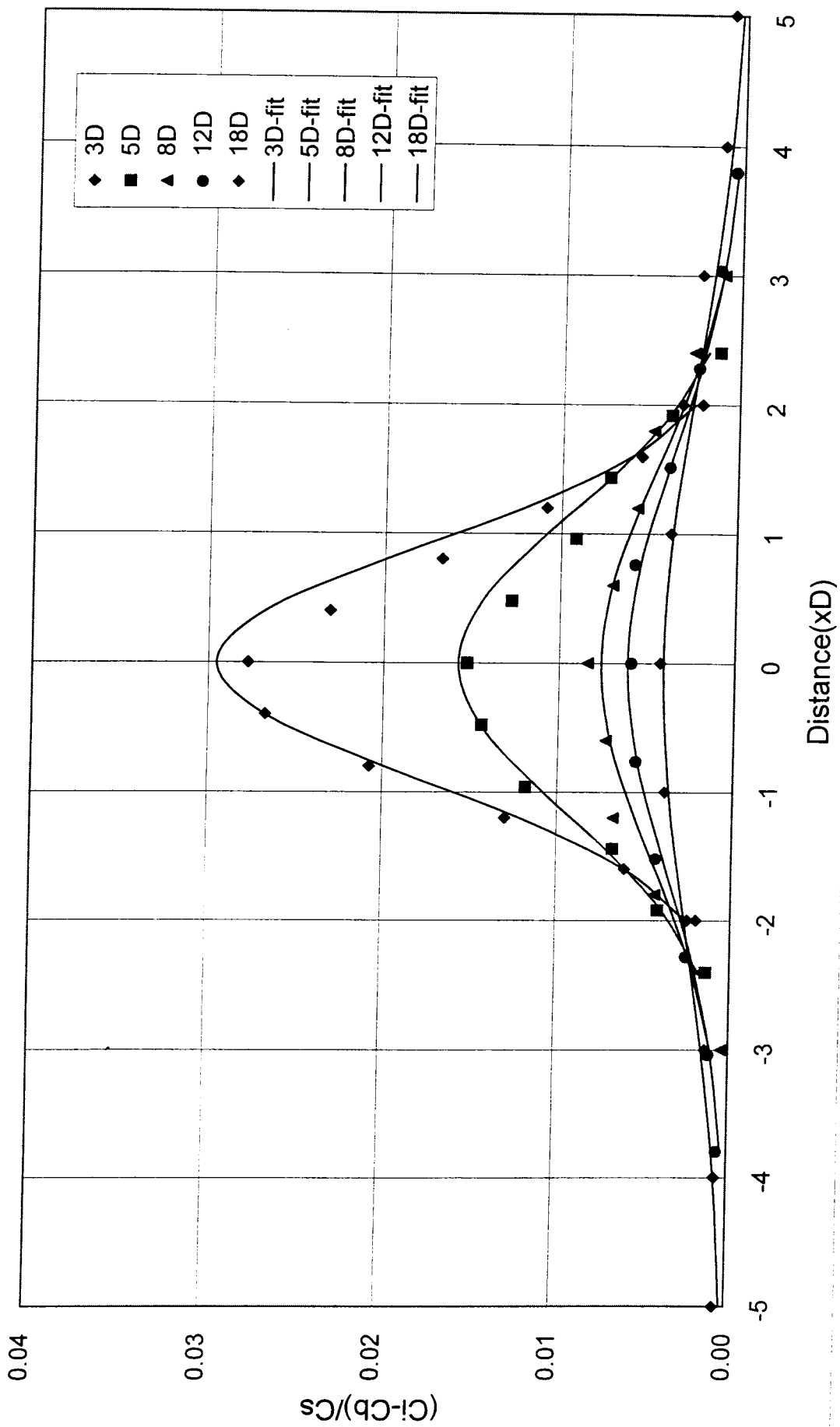


圖 A-13 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/260,  $\rho_s/\rho_a=1.0$ )

# B10F

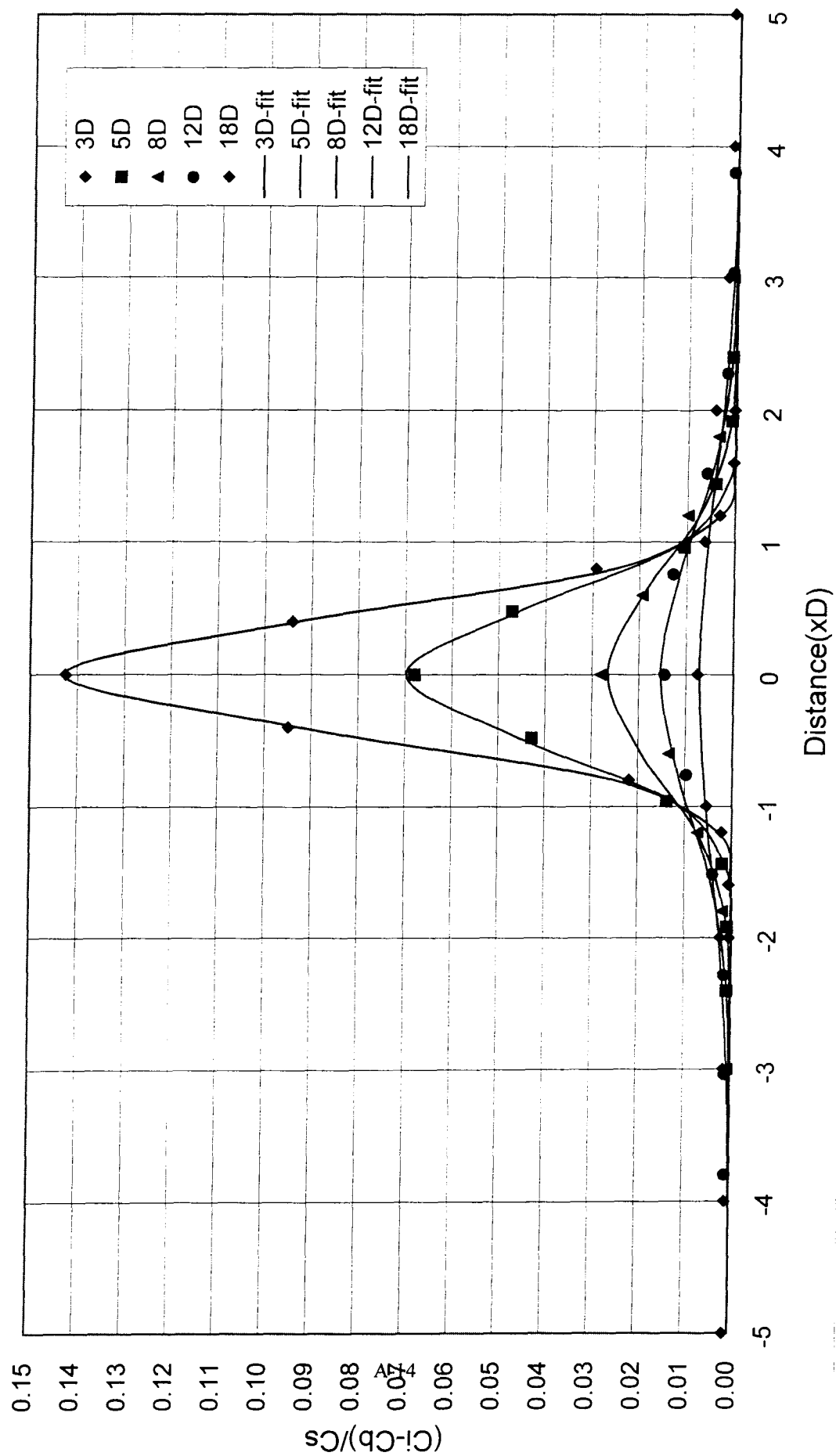


圖 A-14 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/260,  $\rho_s/\rho_a=1.0$ )

# B10M

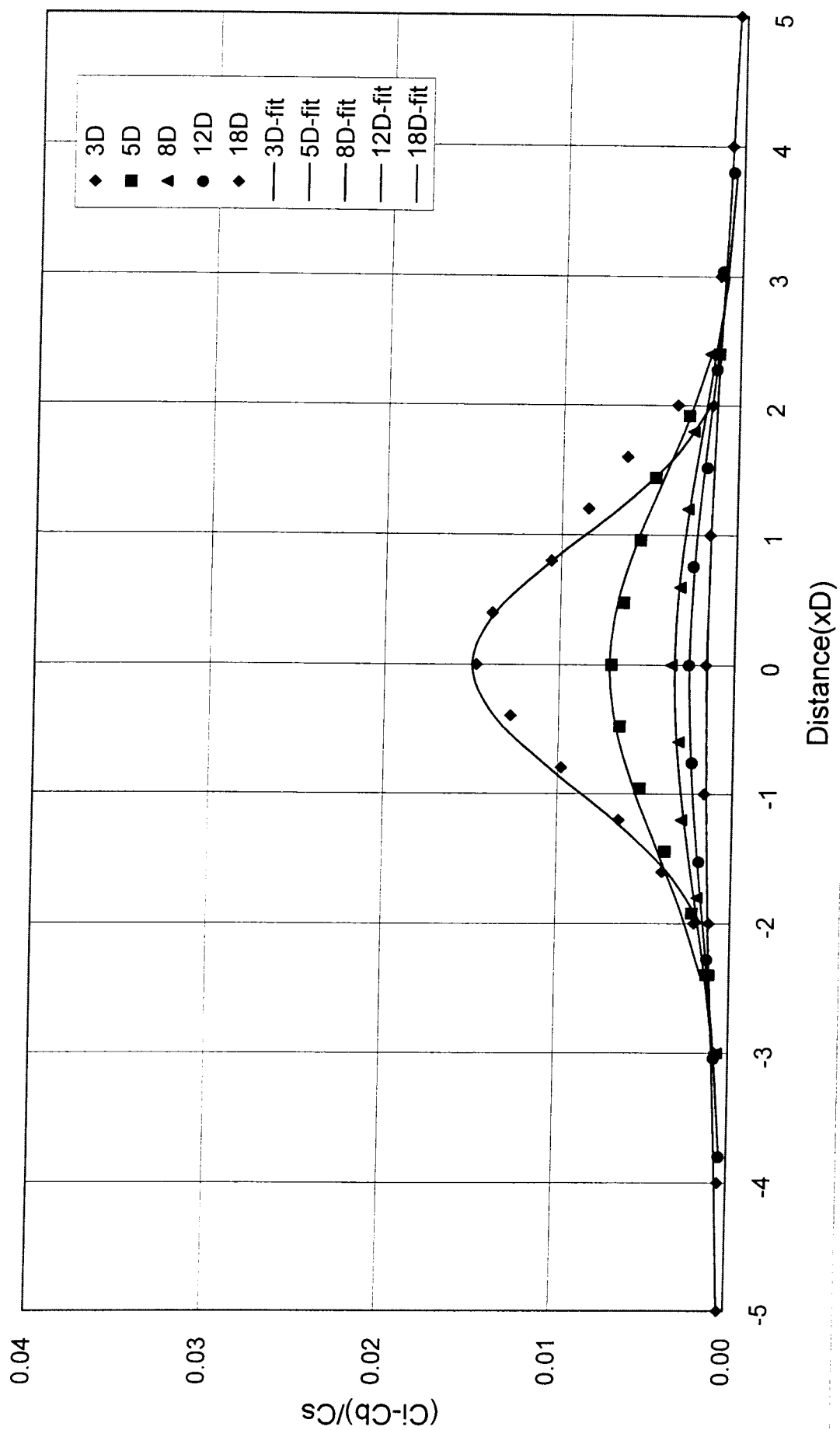


圖 A-15 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/285,  $\rho_s/\rho_a=1.0$ )

# B12B

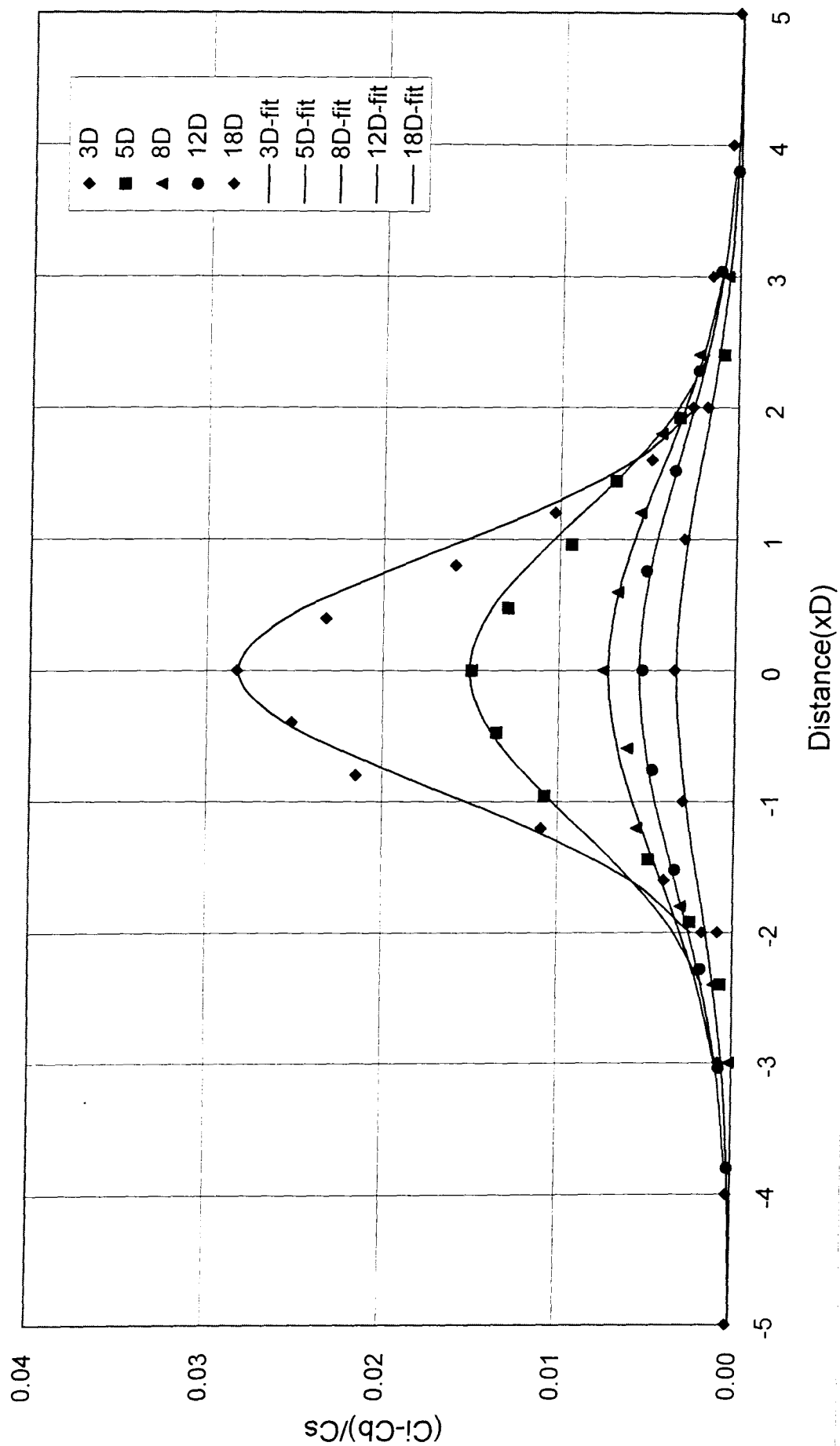


圖 A-16 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/260,  $\rho_s/\rho_a=1.2$ )

# B12F

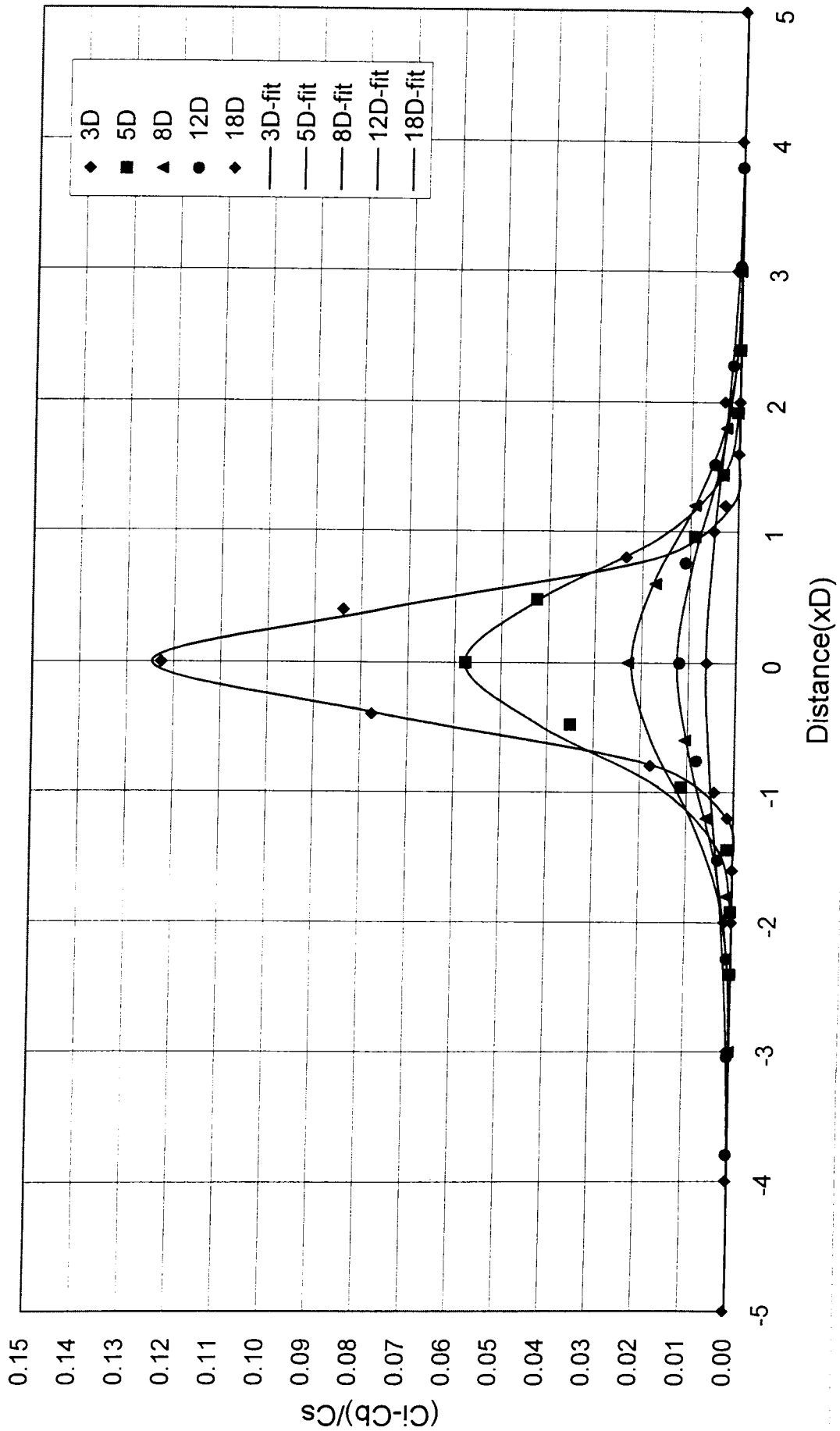


圖 A-17 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/260,  $\rho_s/\rho_a=1.2$ )

# B12M

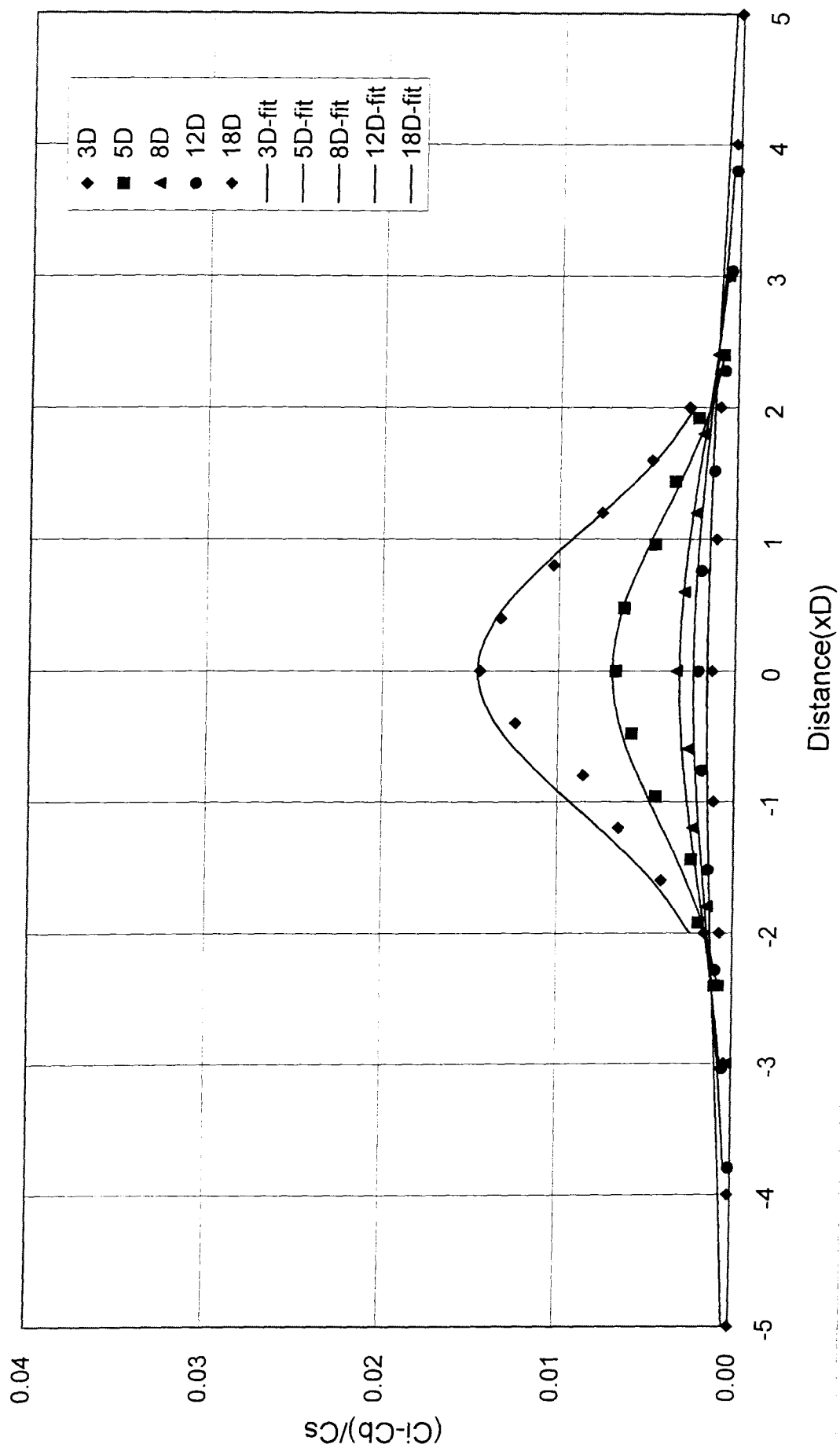


圖 A-18 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/260,  $\rho_s/\rho_a=1.2$ )

# B13B

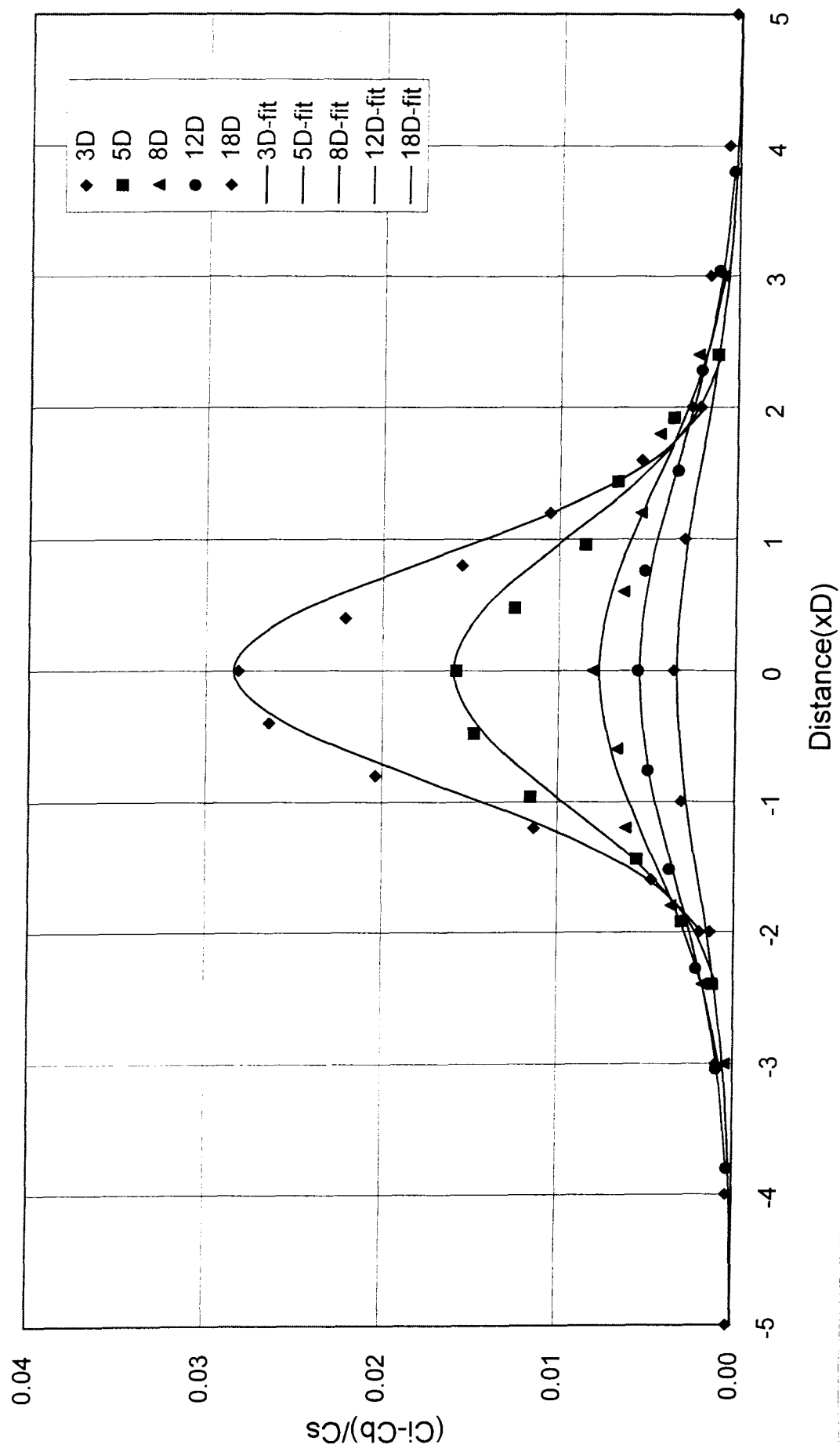


圖 A-19 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/260,  $\rho_s/\rho_a=1.35$ )



# B13F

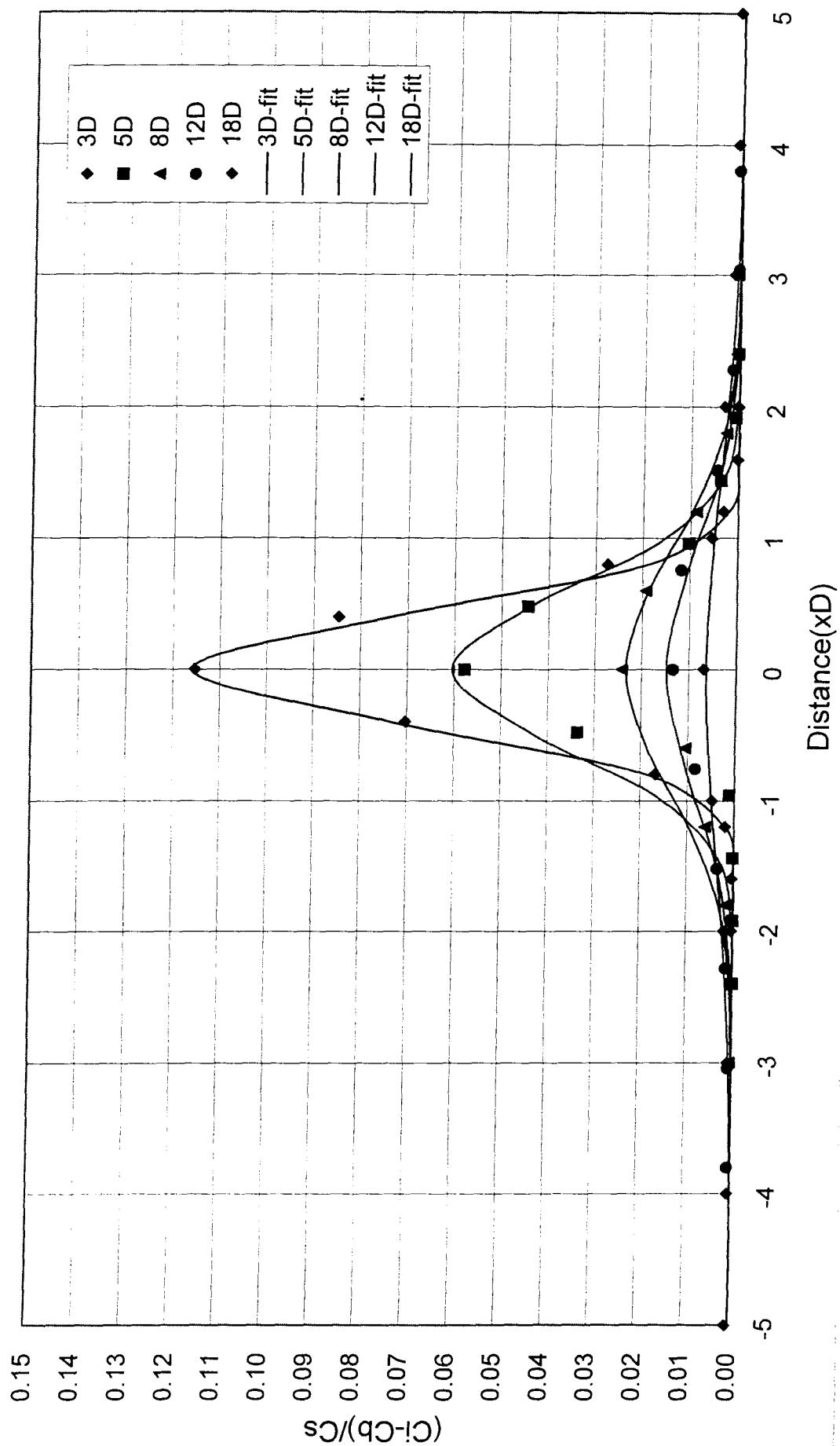


圖 A-20 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/260,  $\rho_s/\rho_a=1.35$ )

# B13M

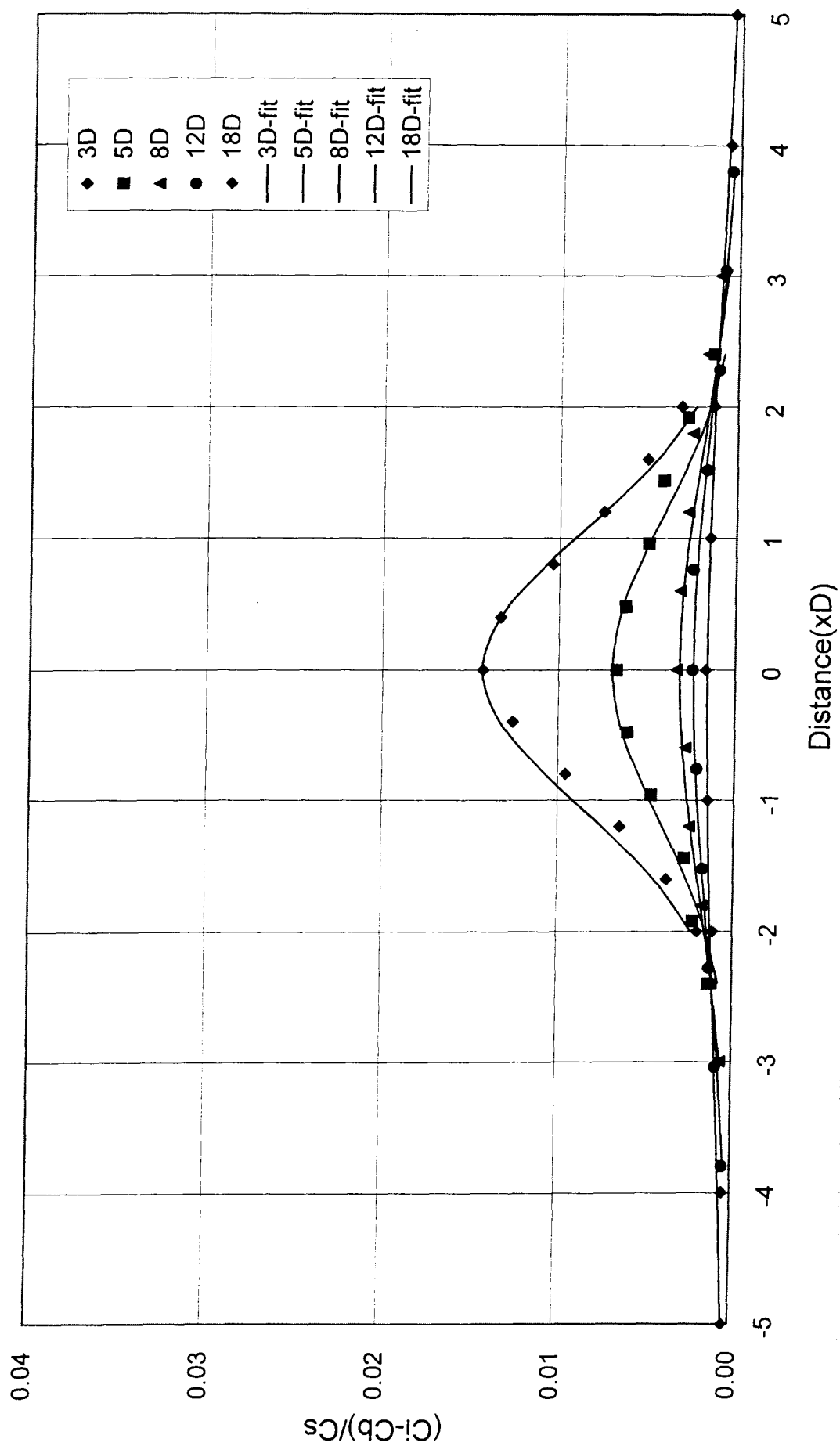


圖 A-21 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/260,  $\rho_s/\rho_a=1.35$ )

# B15B

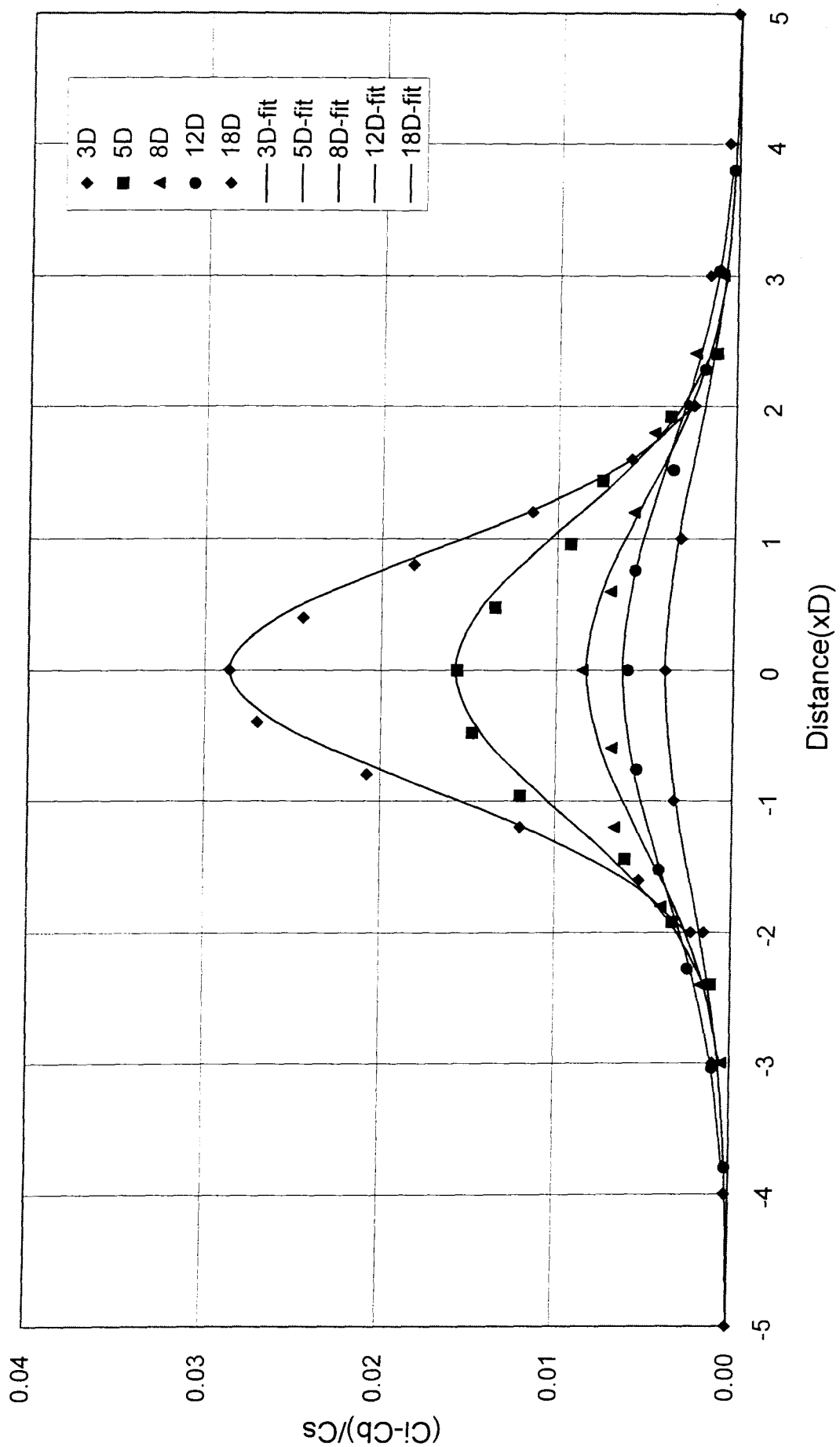


圖 A-22 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/260,  $\rho_s/\rho_a=1.53$ )

# B15F

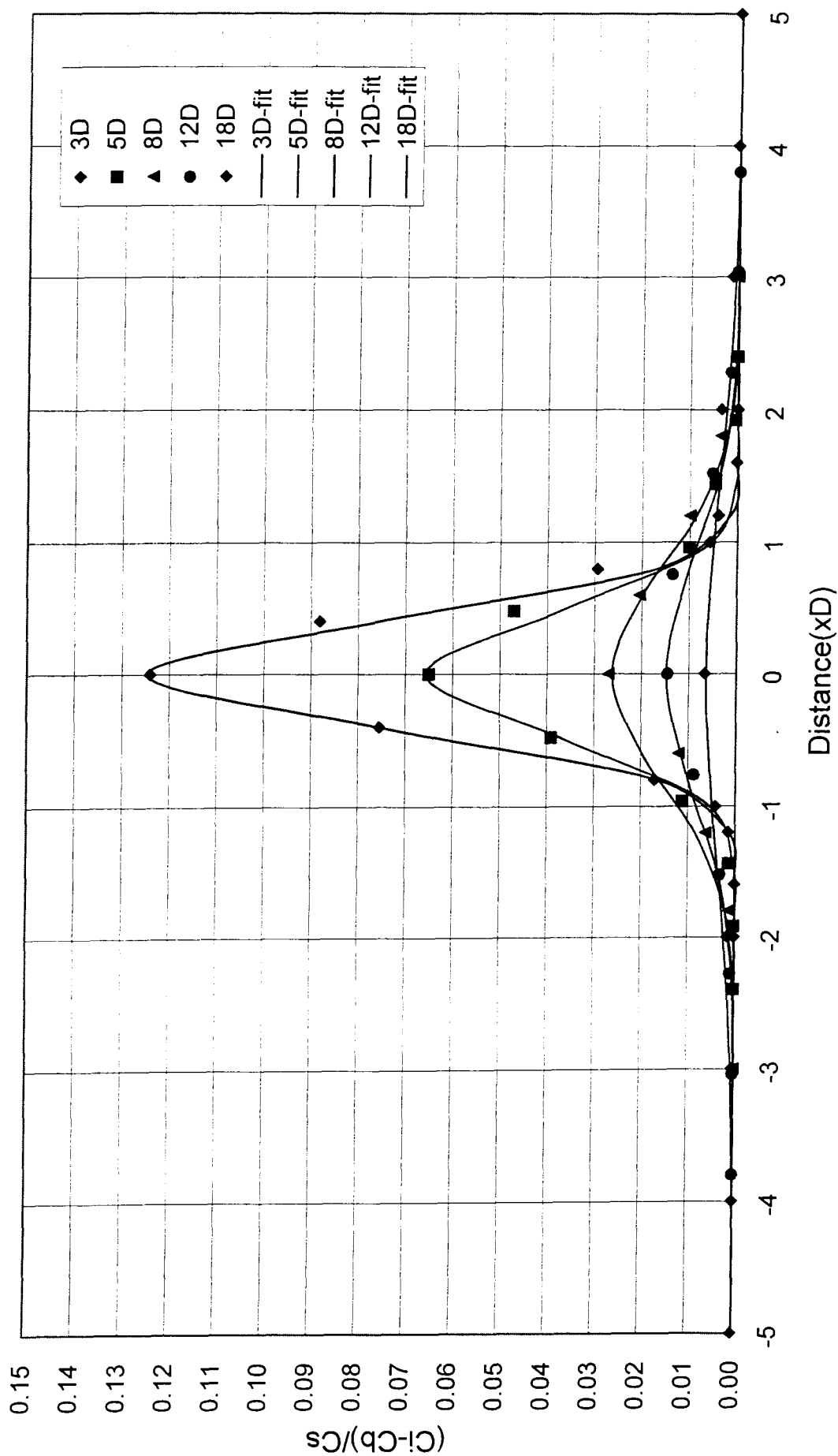


圖 A-23 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/260,  $\rho_s/\rho_a=1.53$ )

# B15M

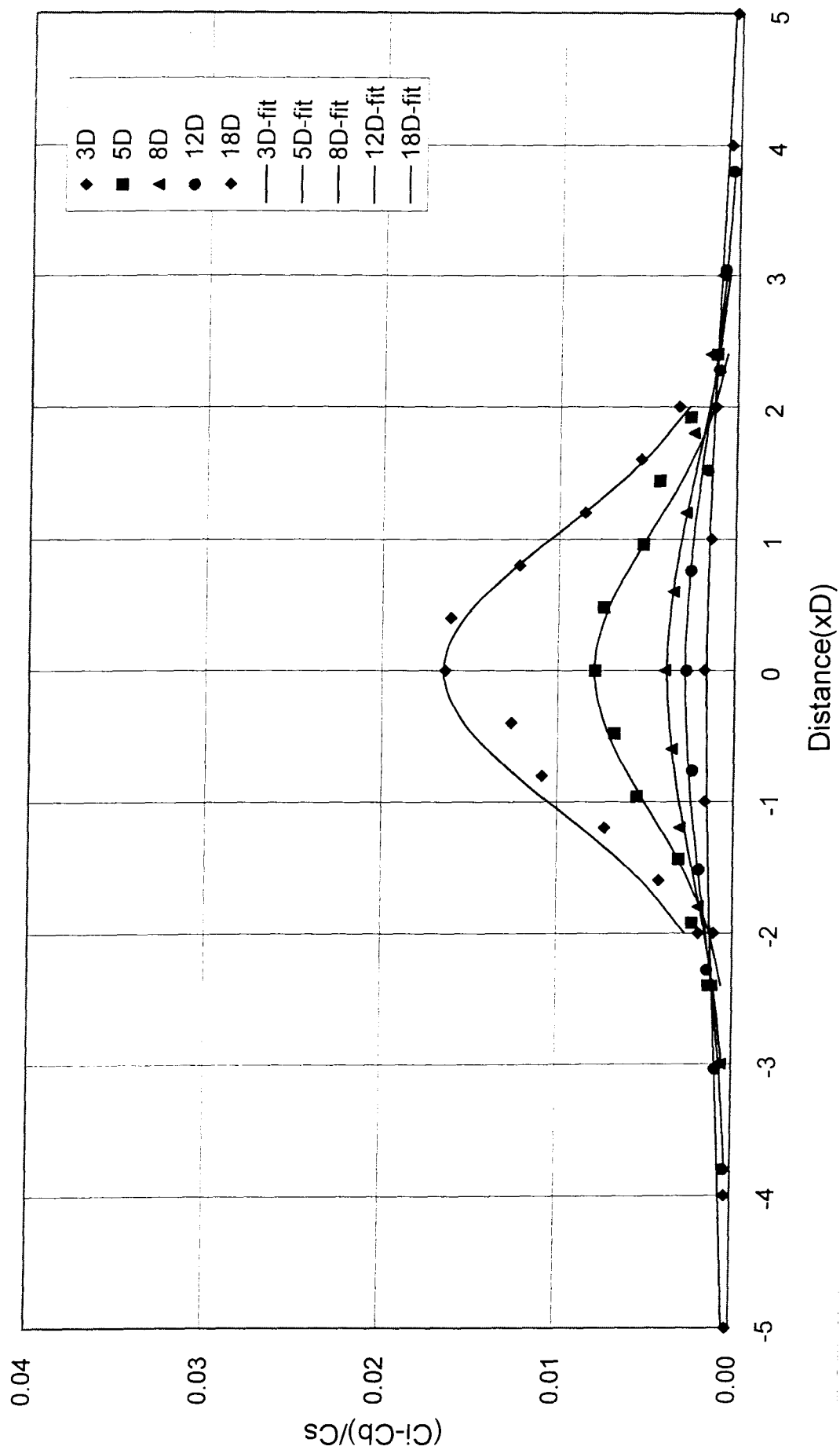


圖 A-24 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/260,  $\rho_s/\rho_a=1.53$ )

# C10B

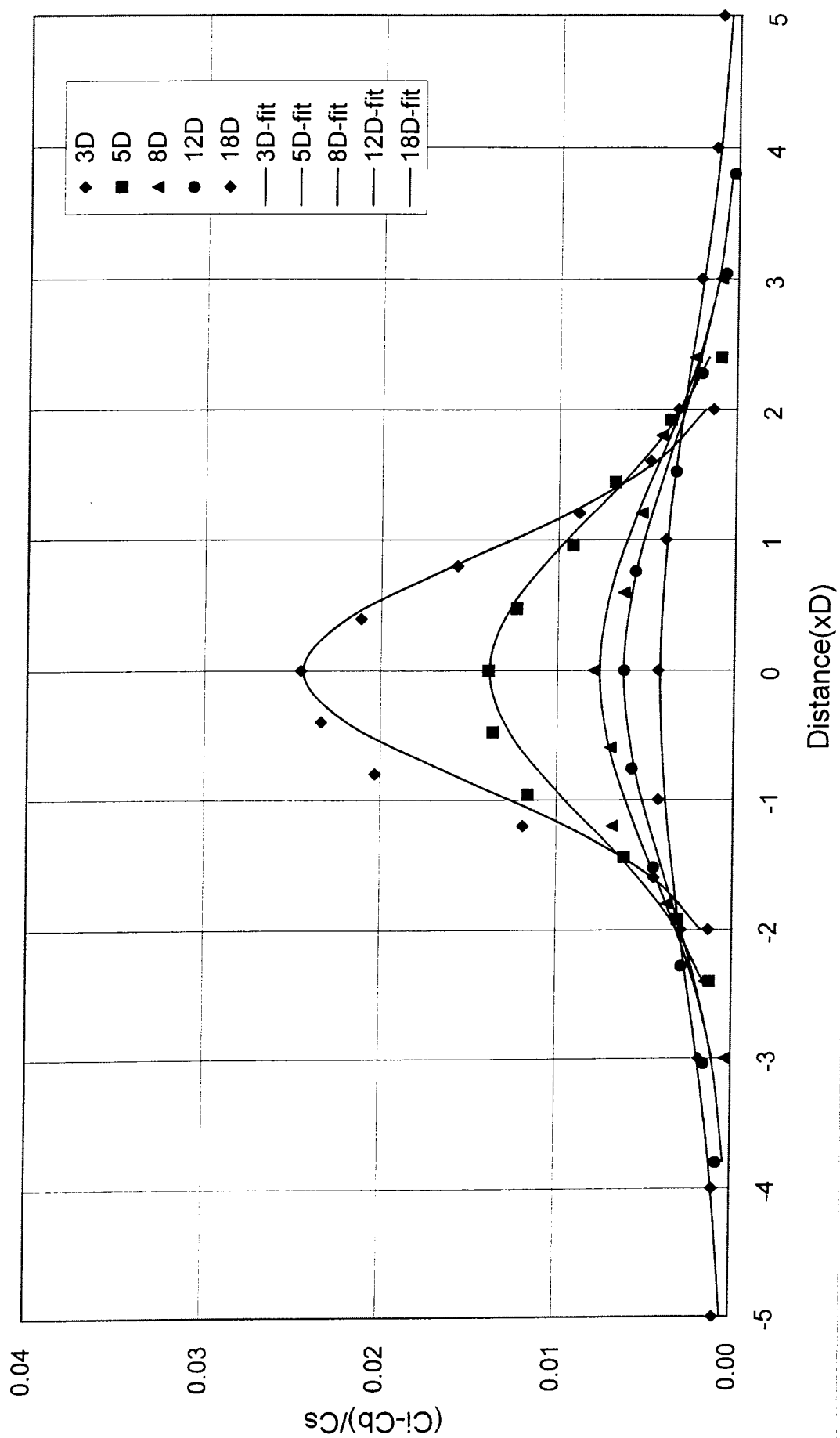


圖 A-25 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/235,  $\rho_s/\rho_a=1.0$ )

# C10F

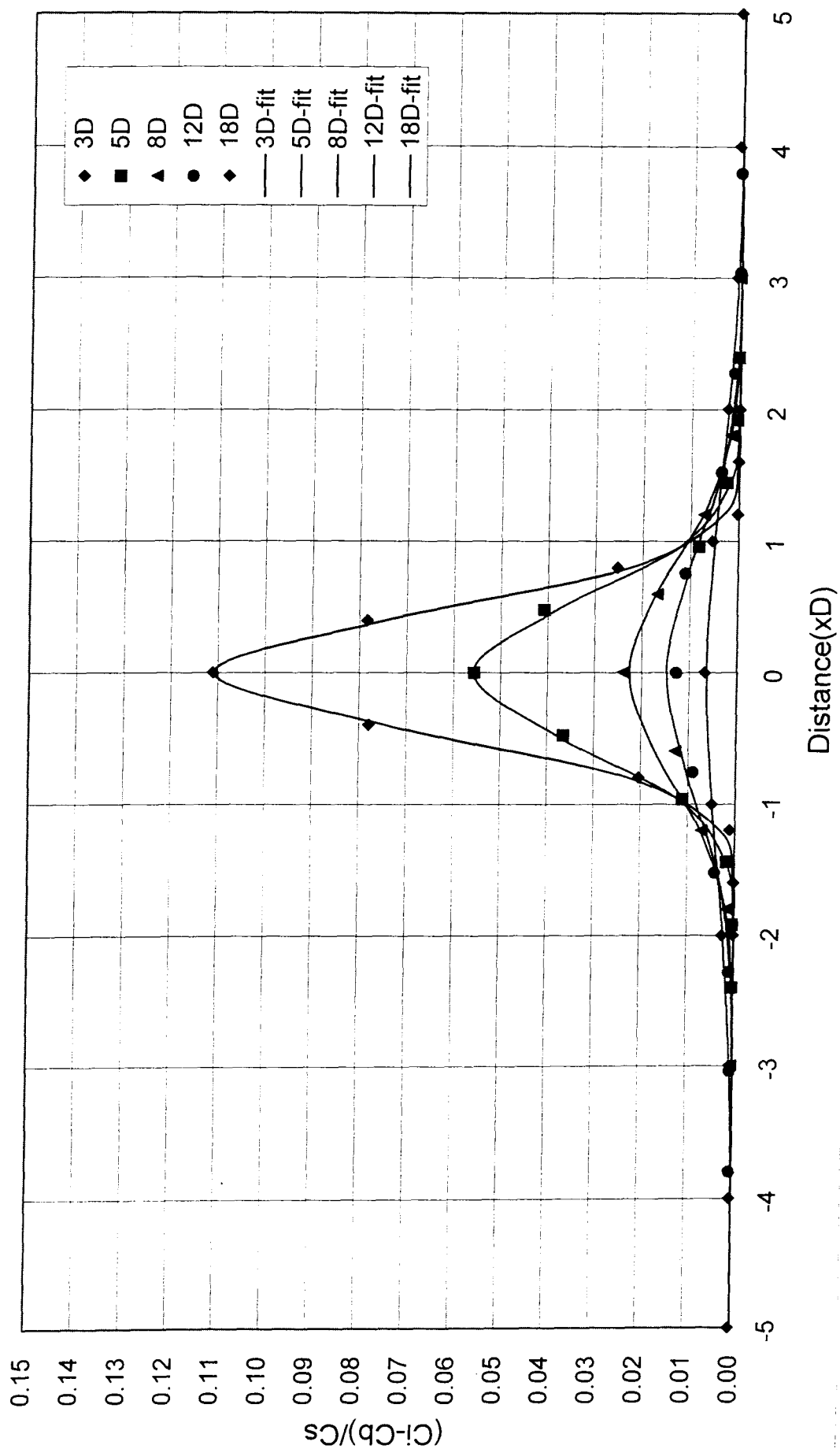


圖 A-26 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/235,  $\rho_s/\rho_a=1.0$ )

# C10M

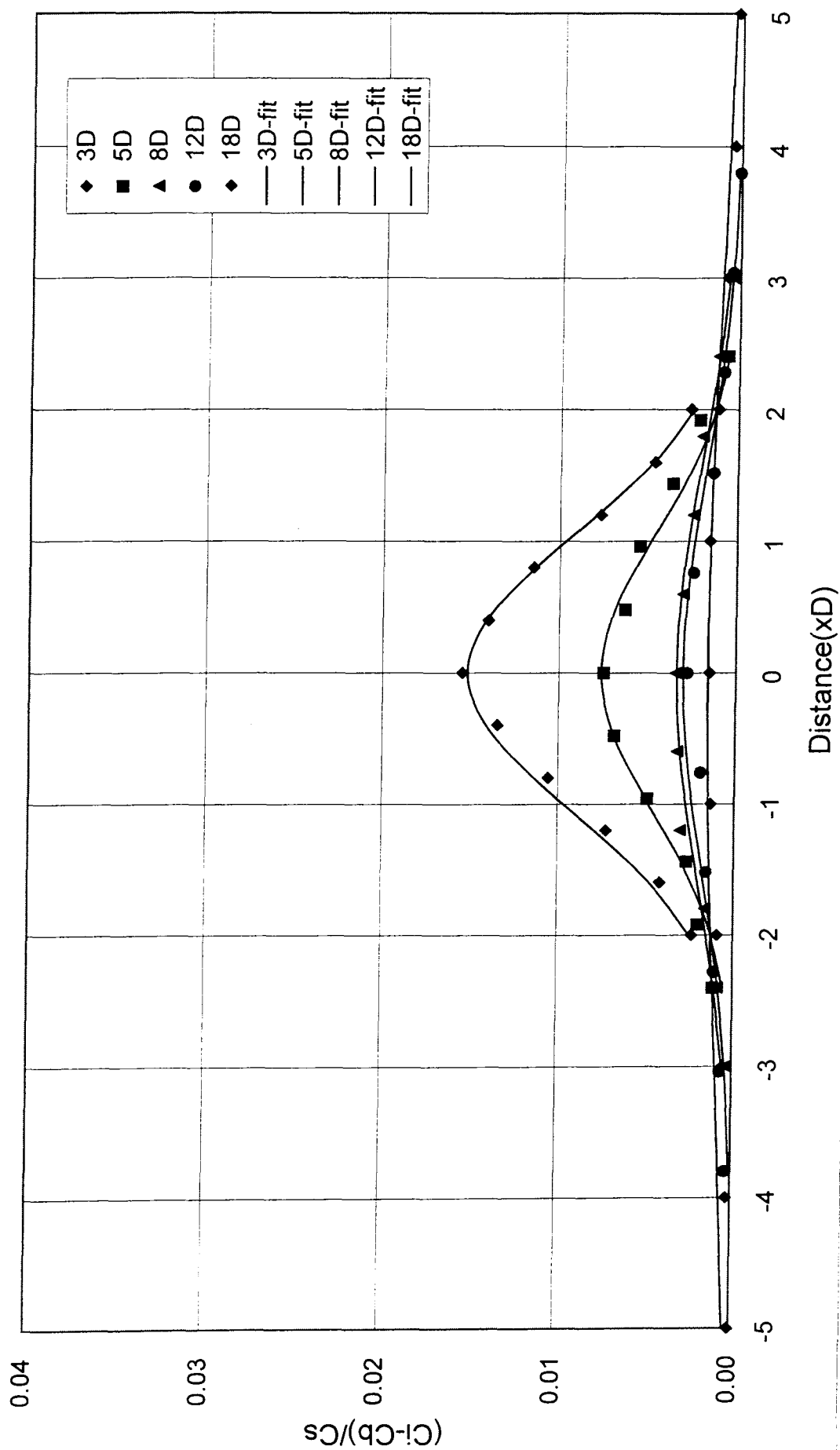


圖 A-27 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/235,  $\rho_s/\rho_a=1.0$ )



# C12B

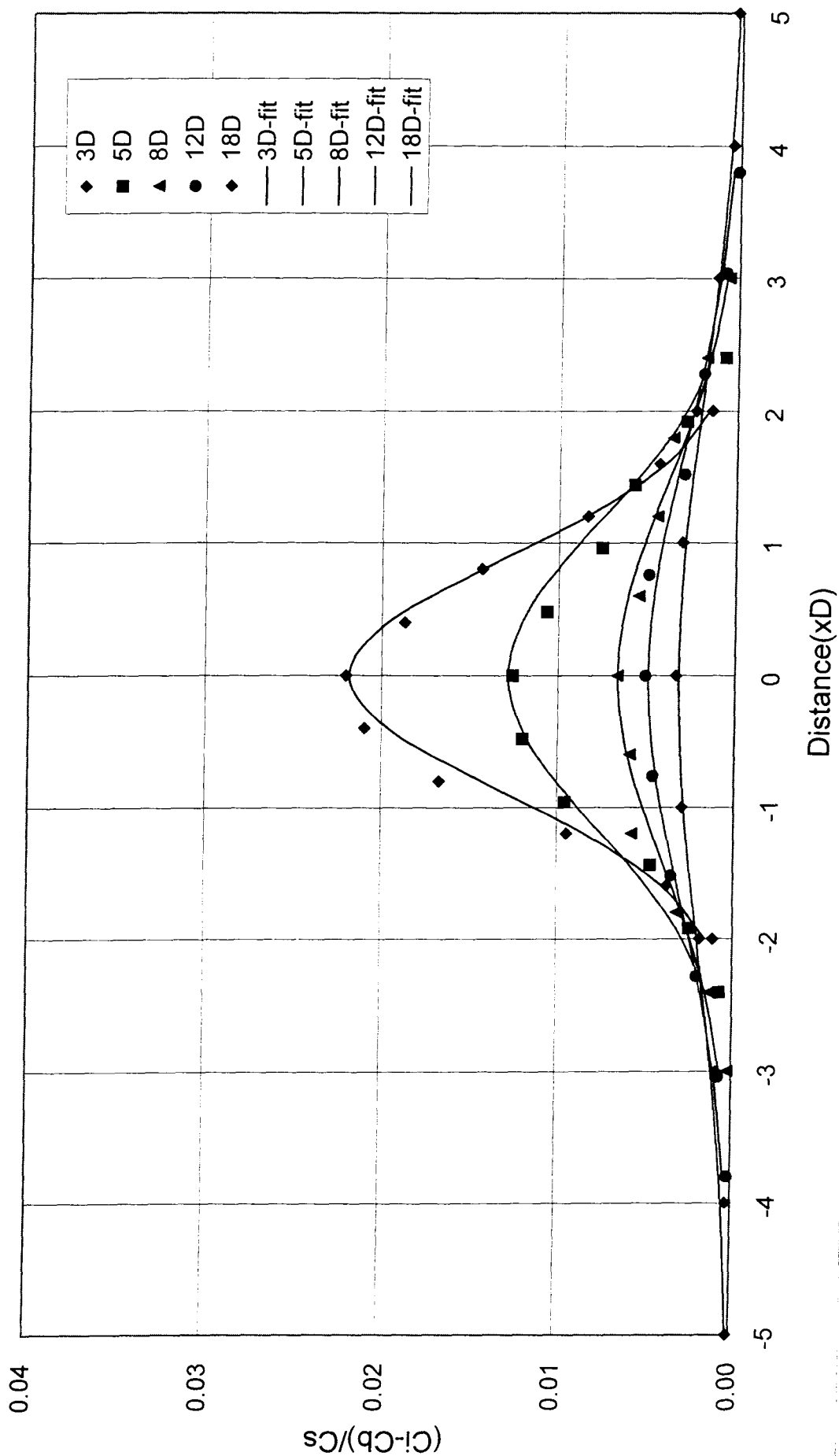


圖 A-28 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/235,  $\rho_s/\rho_a=1.2$ )

# C12F

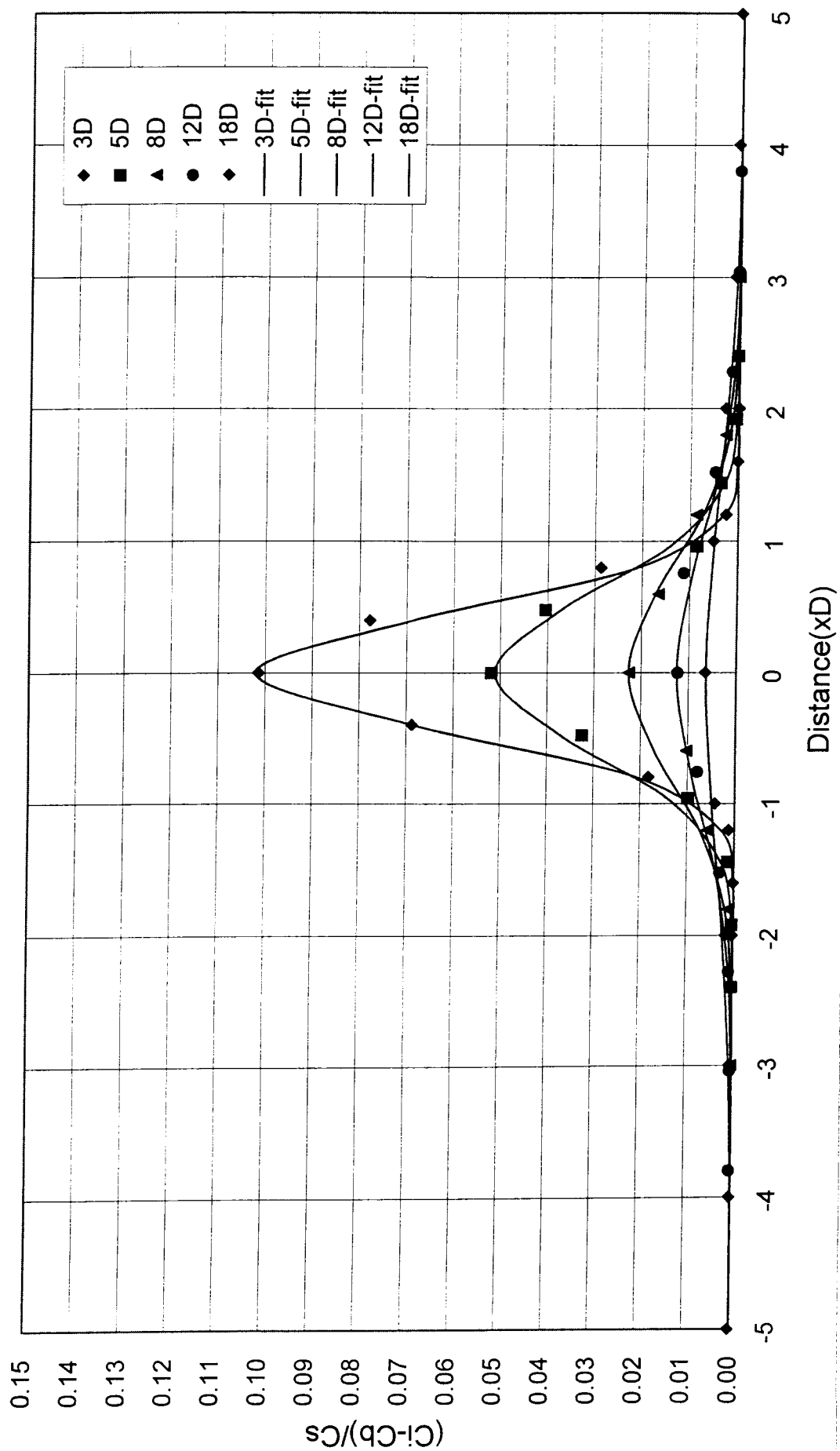


圖 A-29 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/235,  $\rho_s/\rho_a=1.2$ )

# C12M

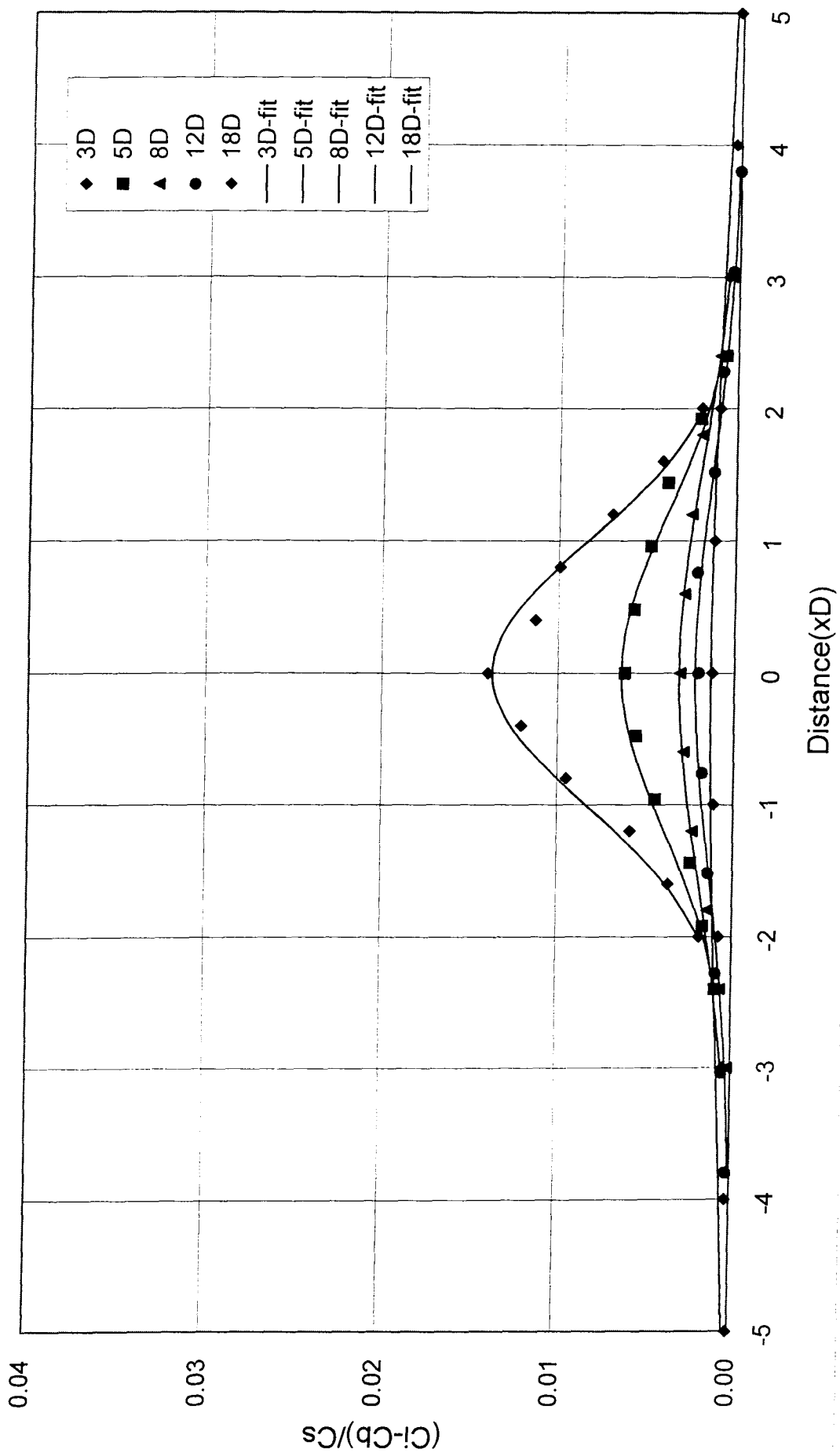


圖 A-30 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/235,  $\rho_s/\rho_a=1.2$ )

# C13B

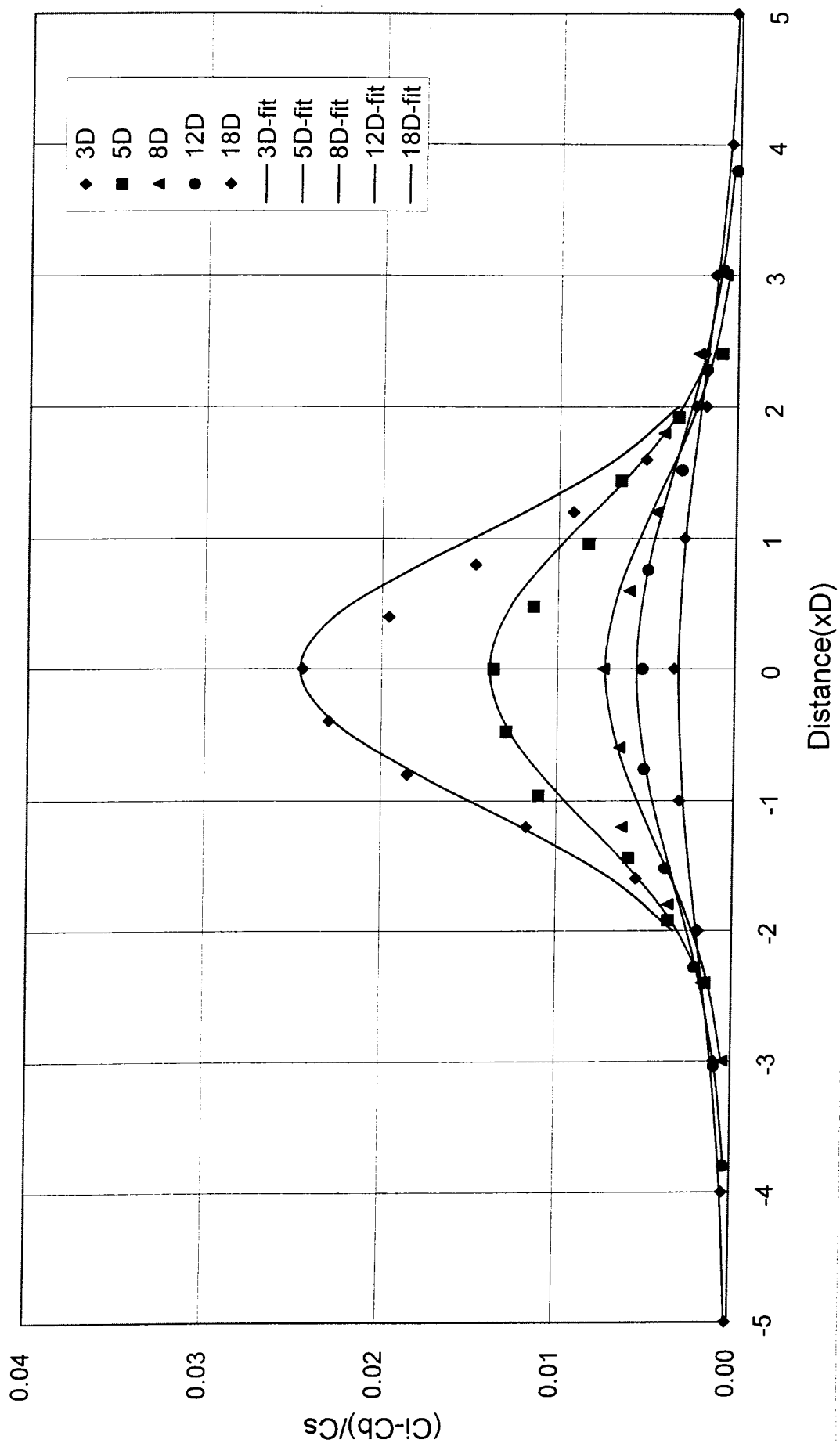


圖 A-31 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/235,  $\rho_s/\rho_a=1.35$ )

# C13F

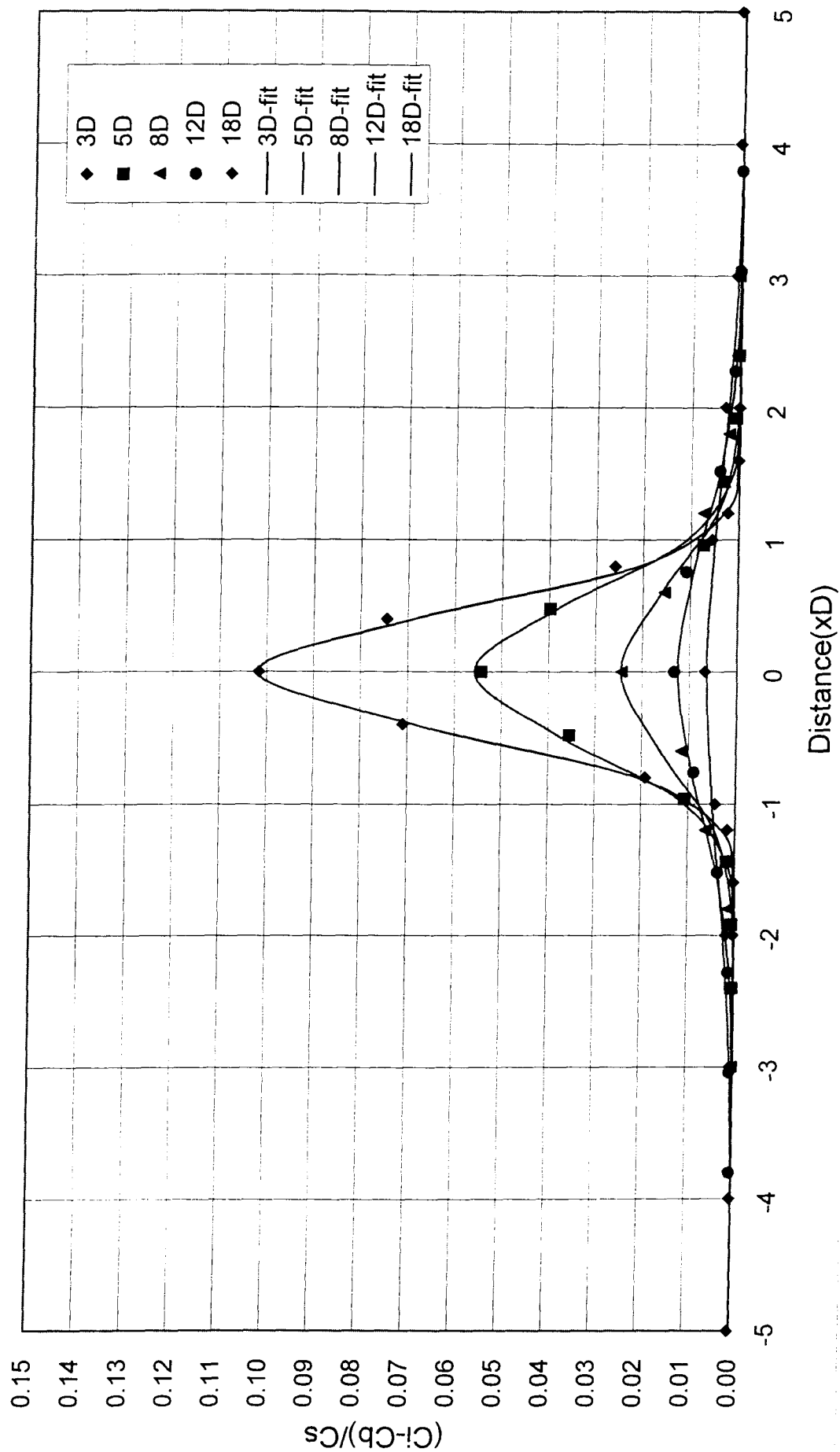


圖 A-32 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/235,  $\rho_s/\rho_a=1.35$ )

# C13M

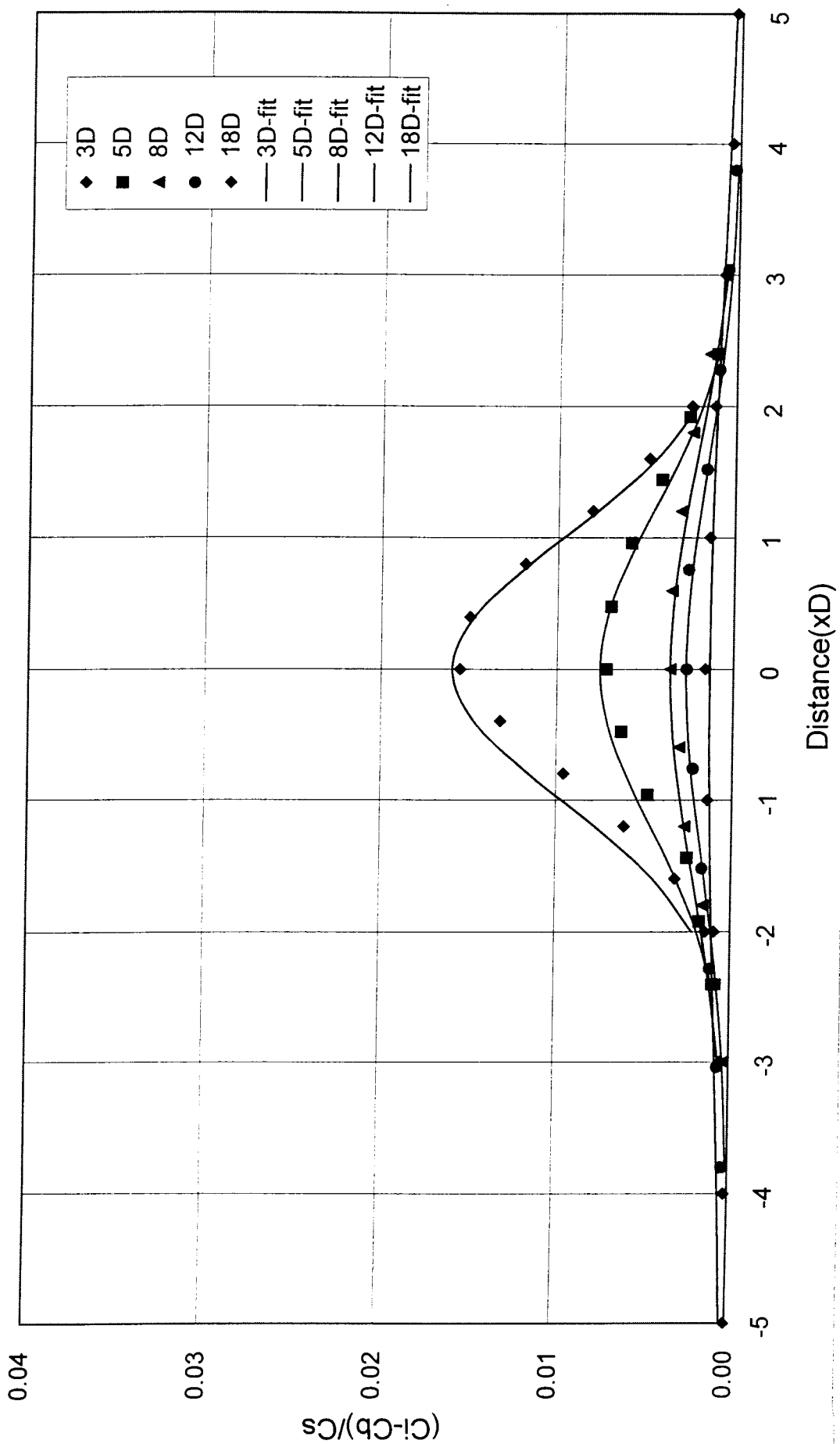


圖 A-33 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/235,  $\rho_s/\rho_a=1.35$ )

# C15B

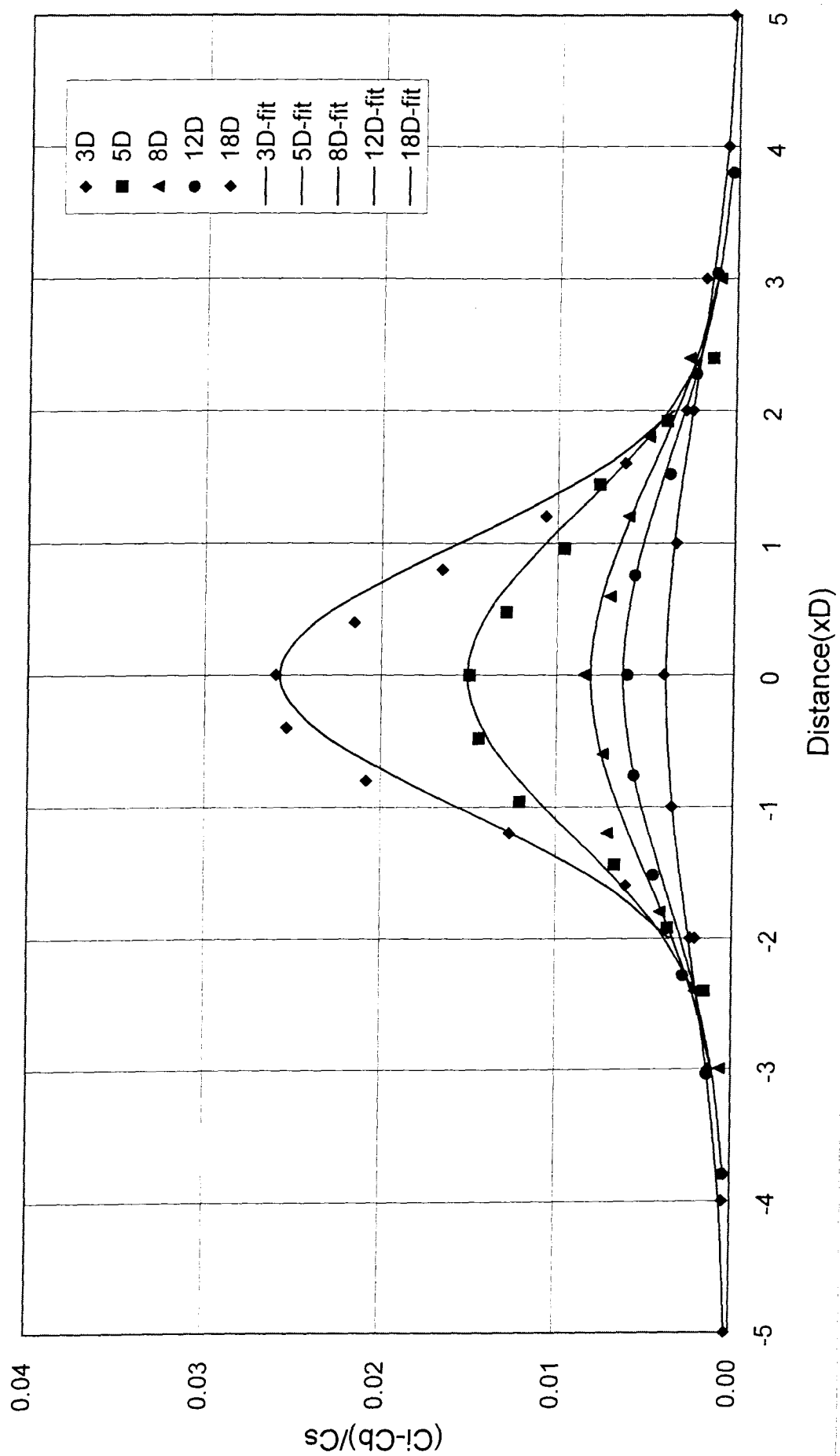


圖 A-34 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/235,  $\rho_s/\rho_a=1.53$ )

# C15F

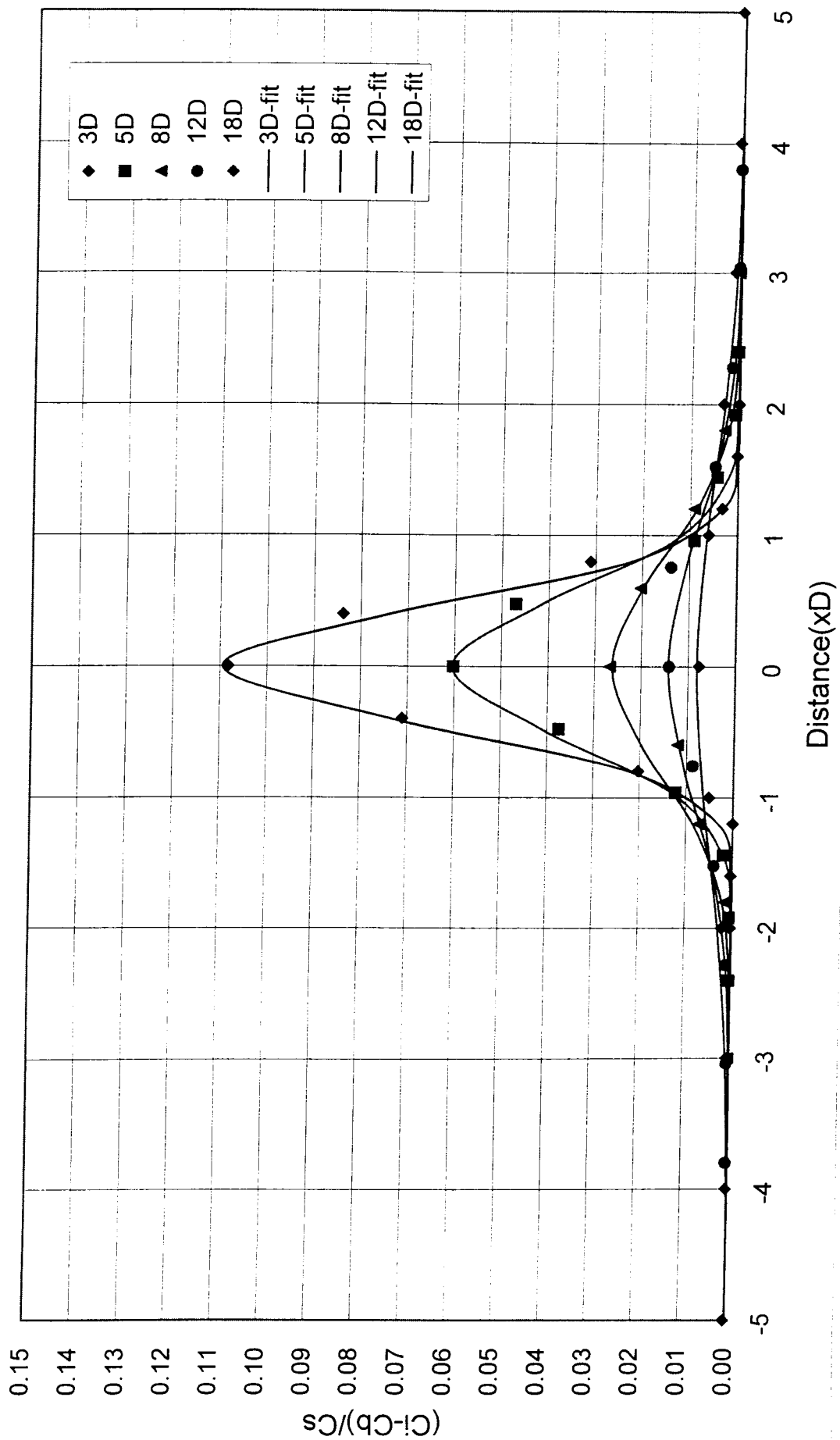


圖 A-35 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/235,  $\rho_s/\rho_a=1.53$ )



# C15M

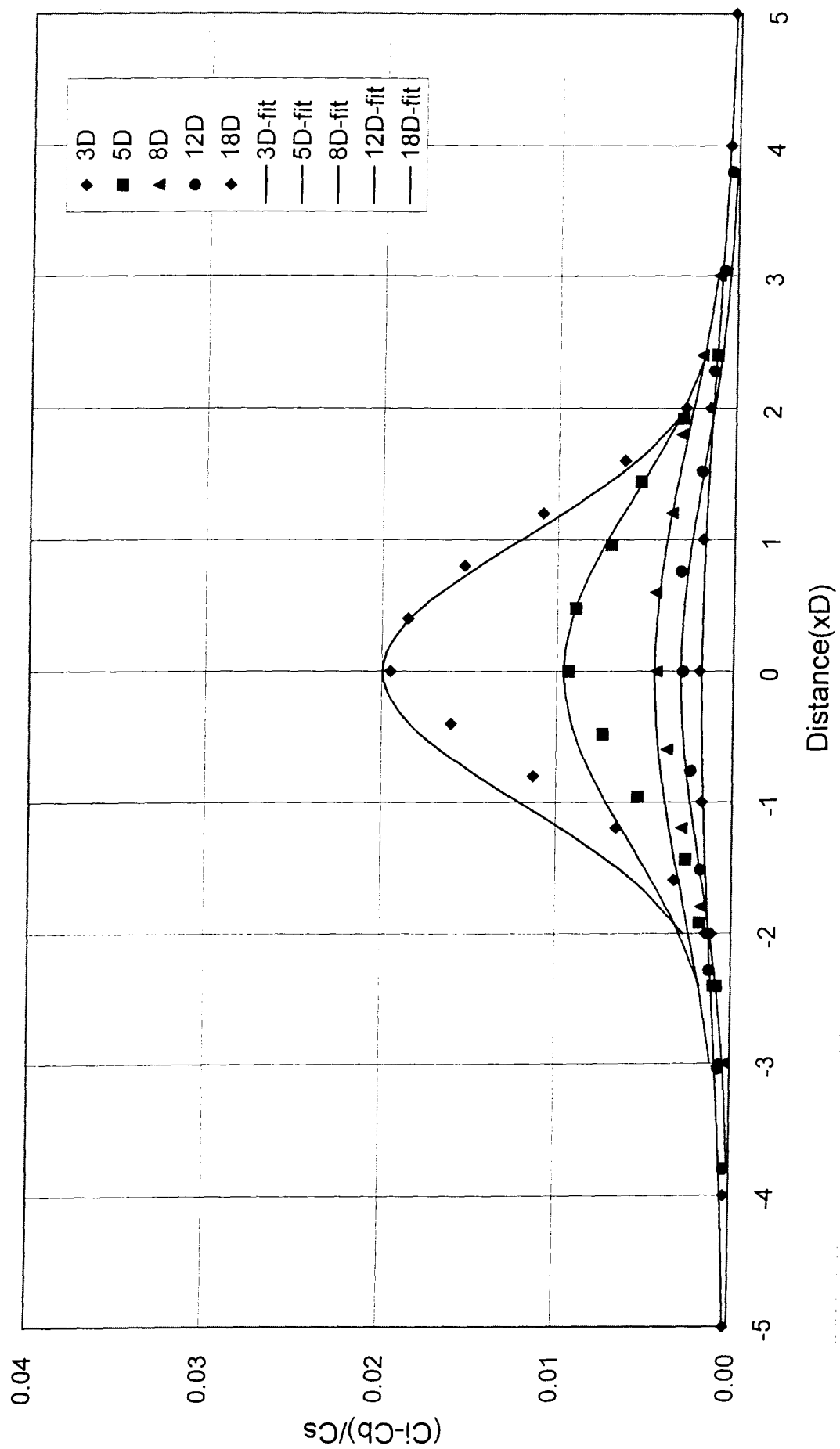


圖 A-36 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/235,  $\rho_s/\rho_a=1.53$ )

# D10B

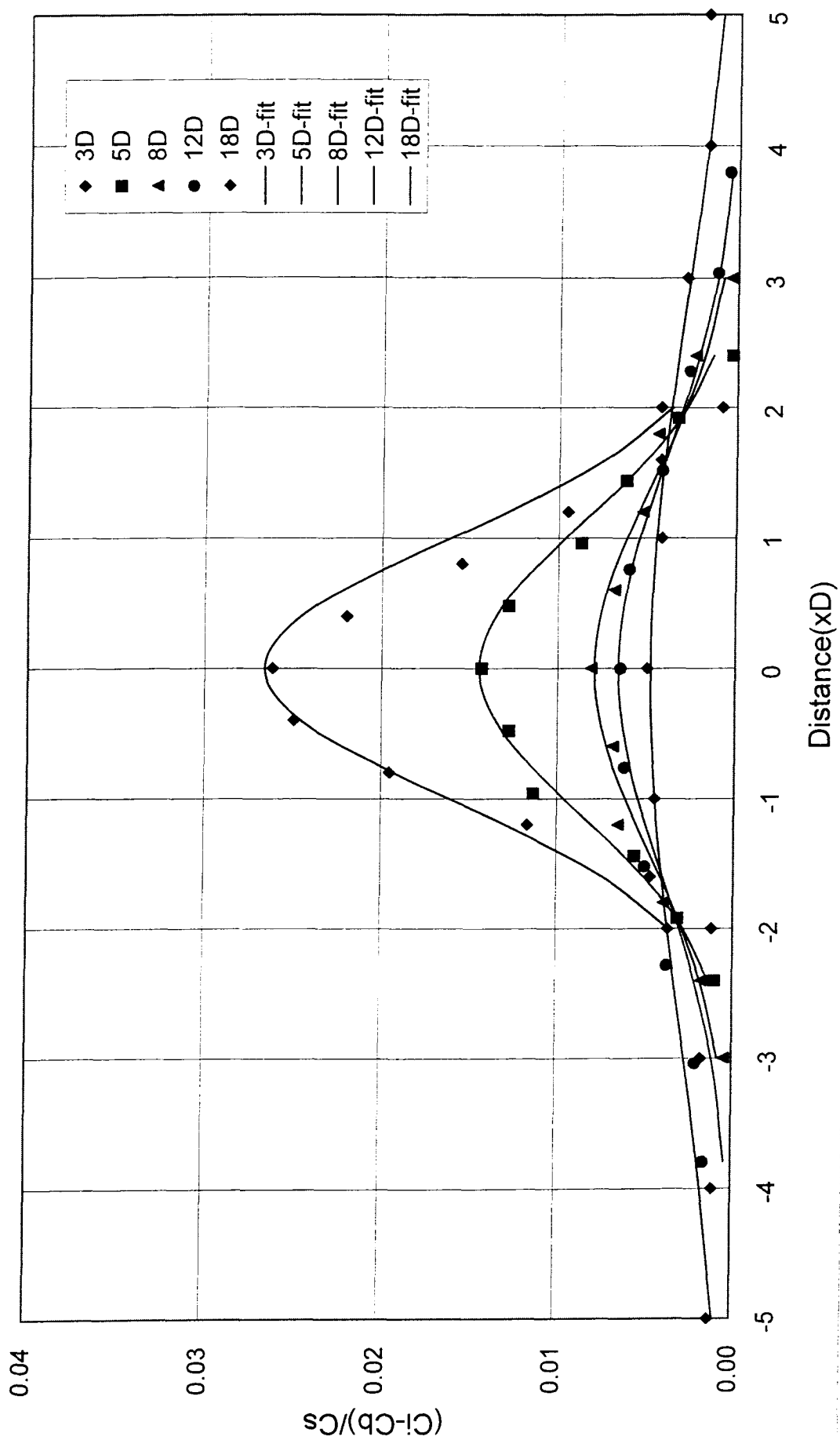


圖 A-37 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/205,  $\rho_s/\rho_a=1.0$ )

# D10F

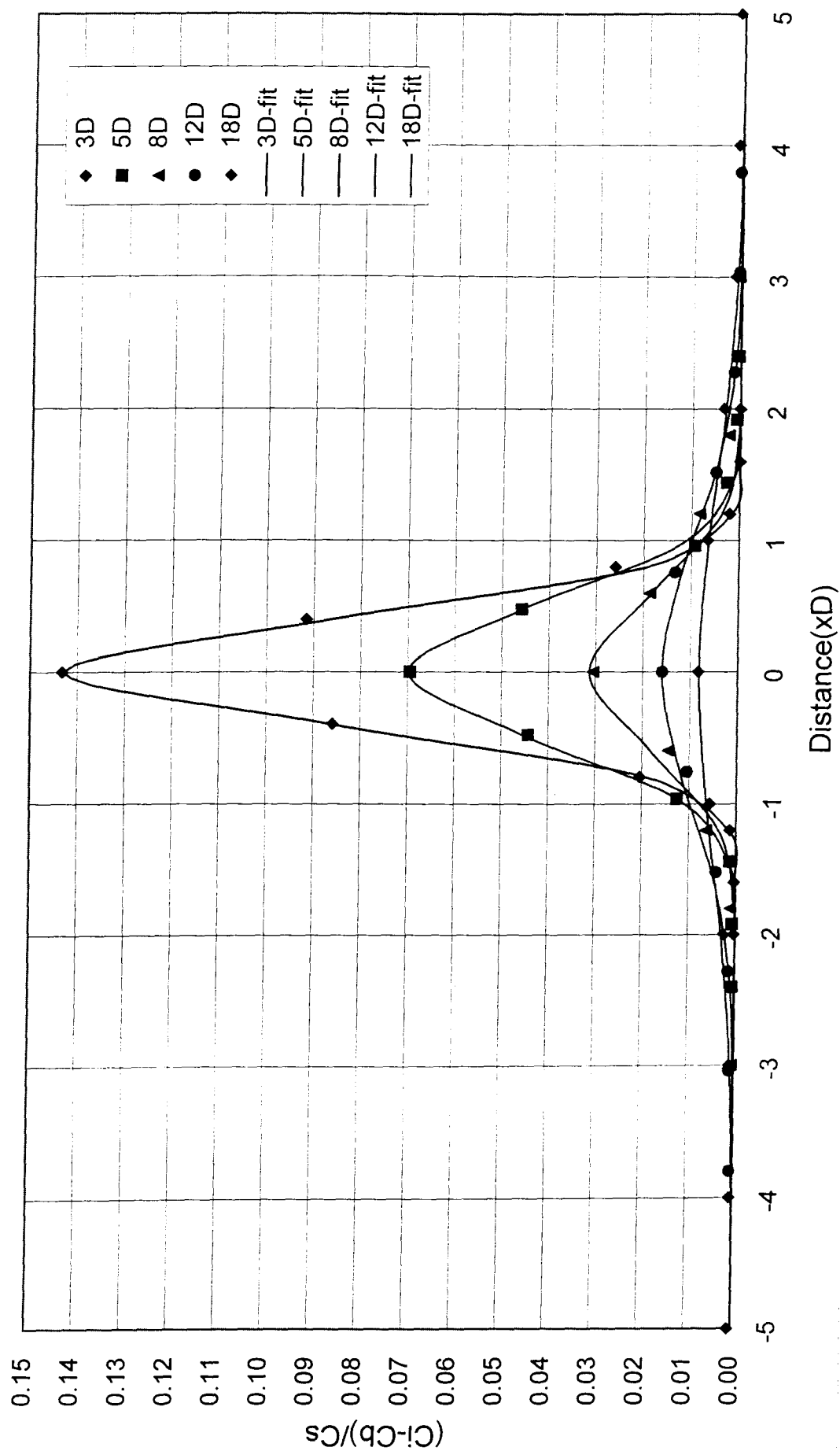


圖 A-38 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/205,  $\rho_s/\rho_a=1.0$ )

# D10M

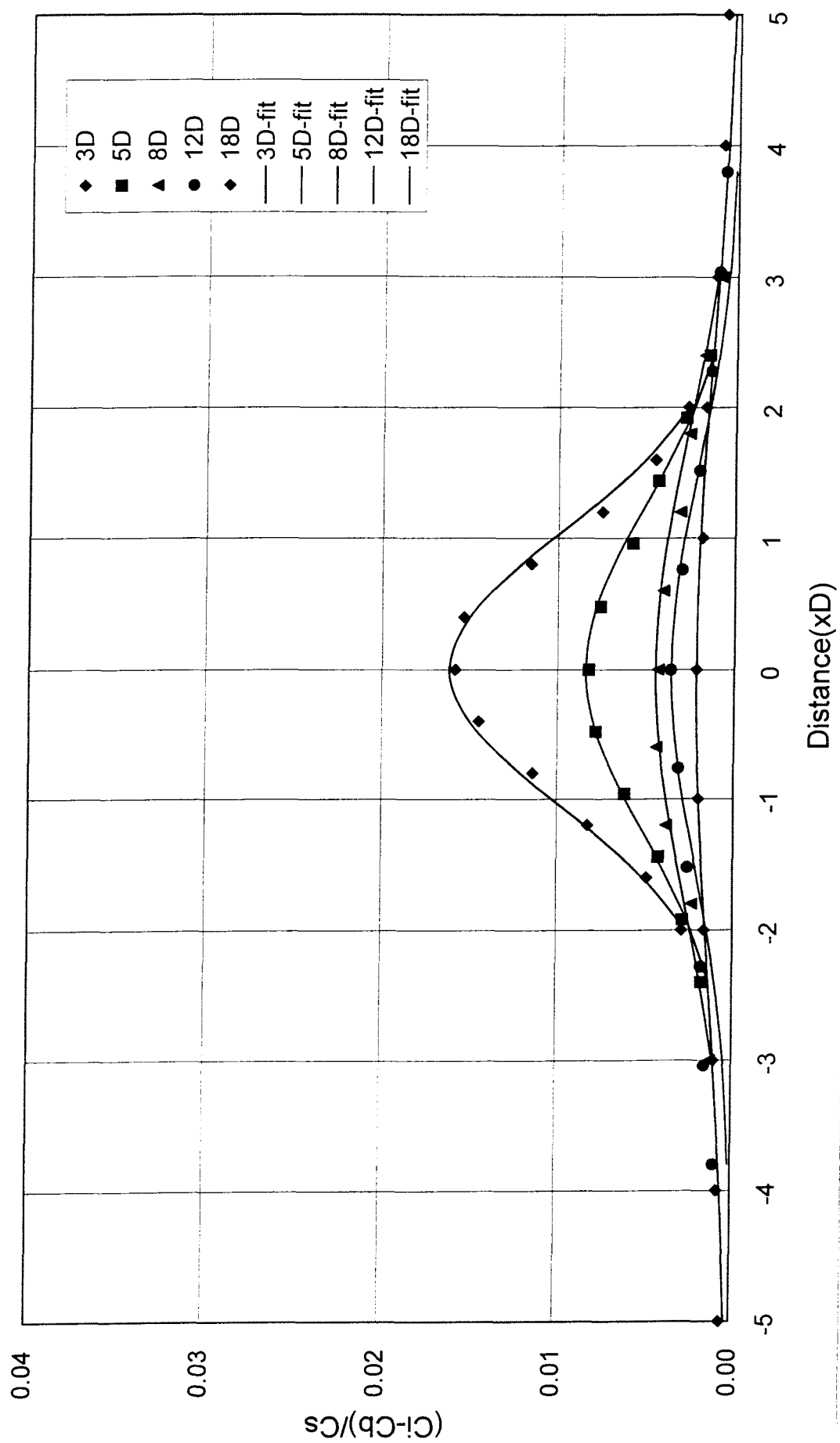


圖 A-39 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/205,  $\rho_s/\rho_a=1.0$ )

# D12B

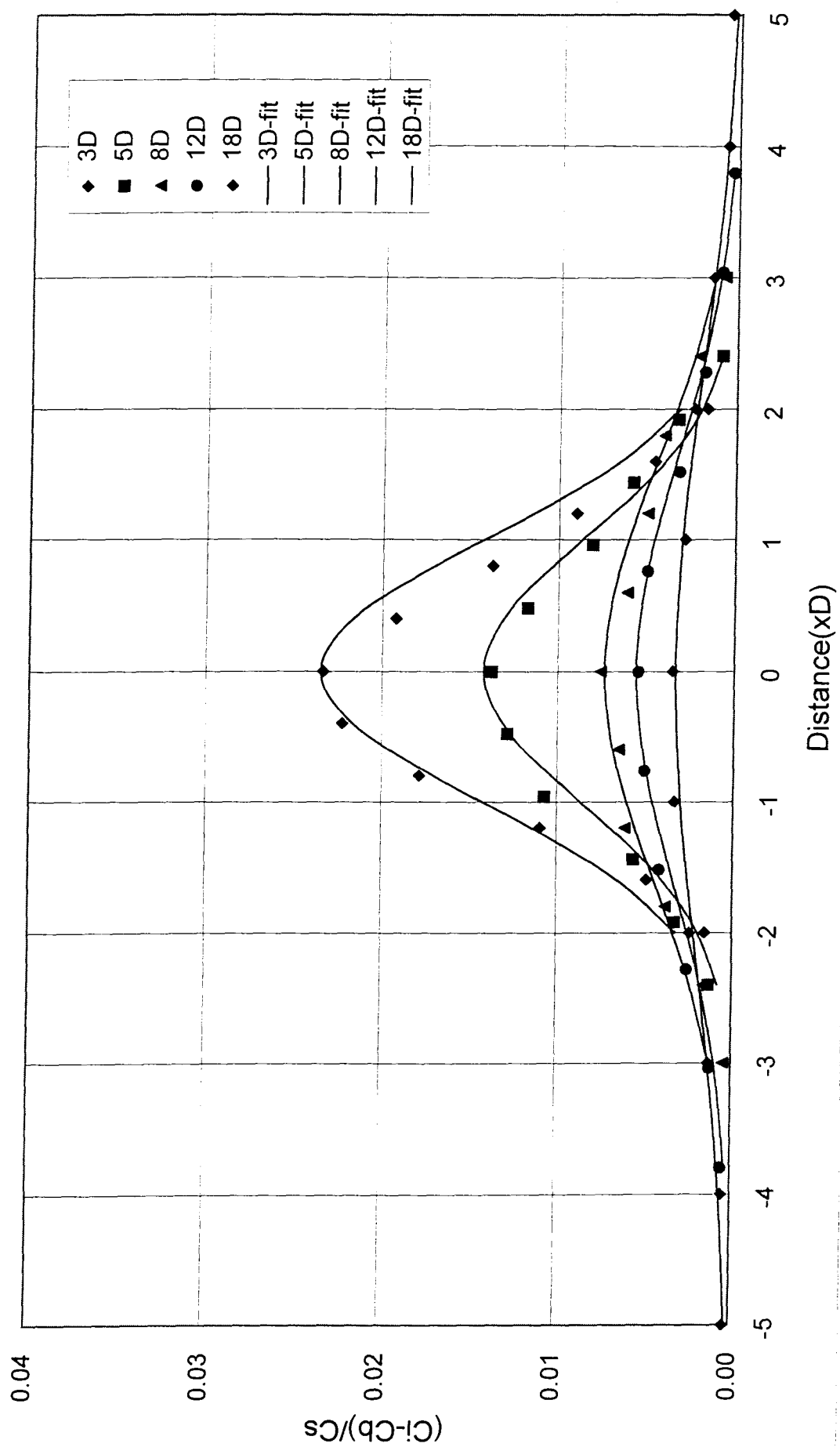


圖 A-40 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/205,  $\rho_s/\rho_a=1.2$ )

# D12F

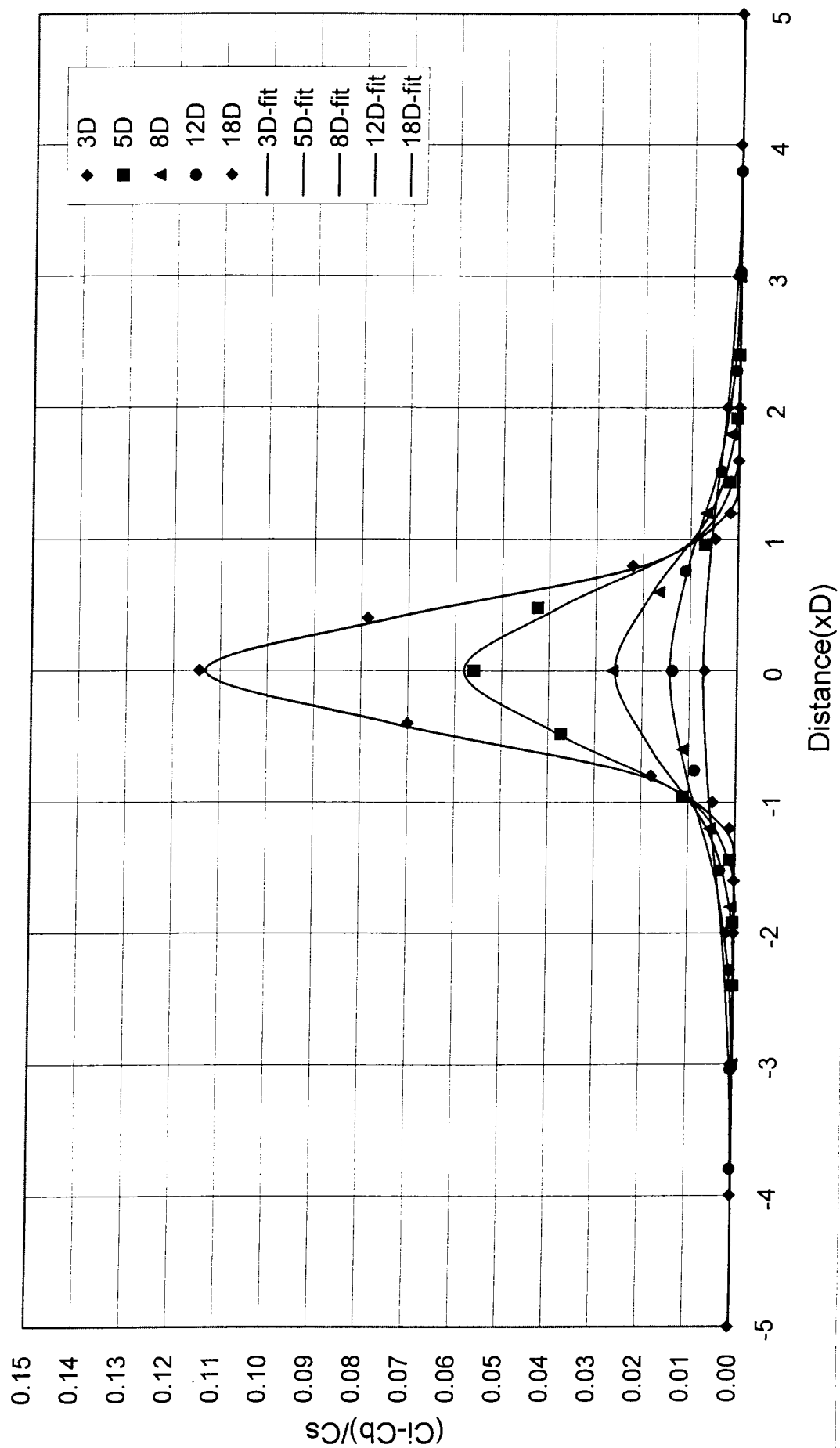


圖 A-41 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/205,  $\rho_s/\rho_a=1.2$ )

# D12M

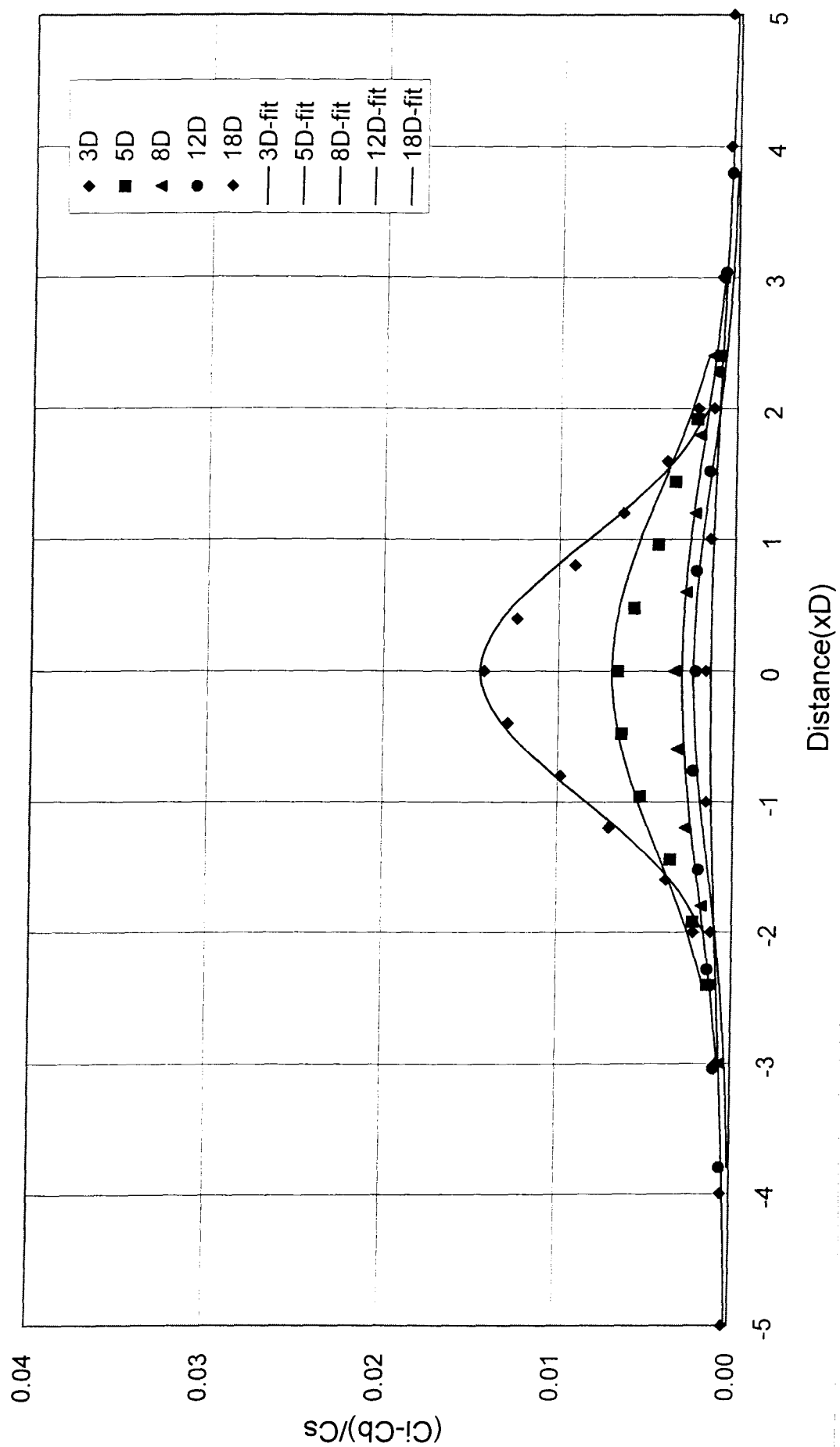


圖 A-42 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面 (scale=1/205,  $\rho_s/\rho_a=1.2$ )

# D13B

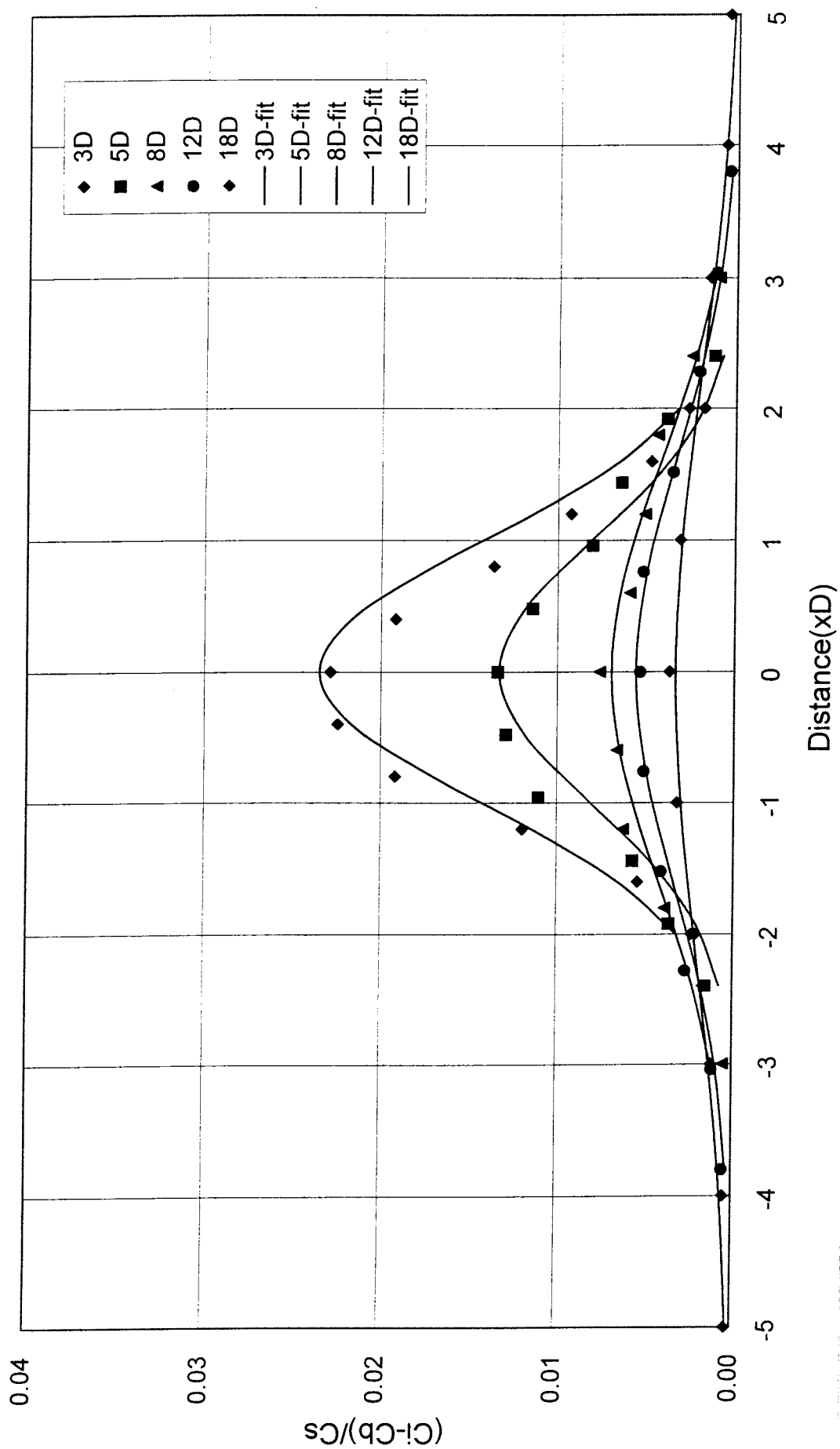


圖 A-43 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/205,  $\rho_s/\rho_a=1.35$ )



# D13F

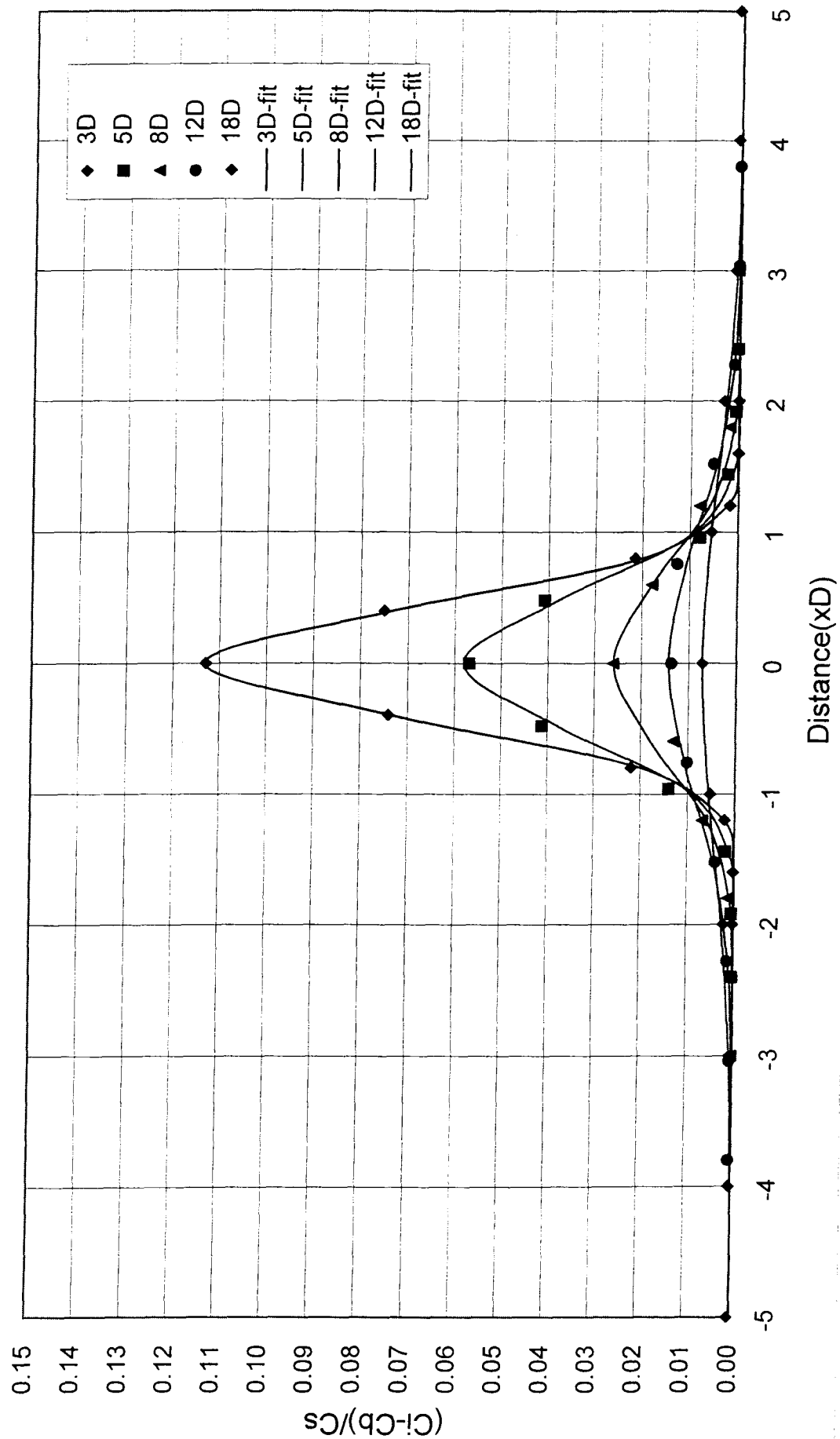


圖 A-44 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/205,  $\rho_s/\rho_a=1.35$ )

# D13M

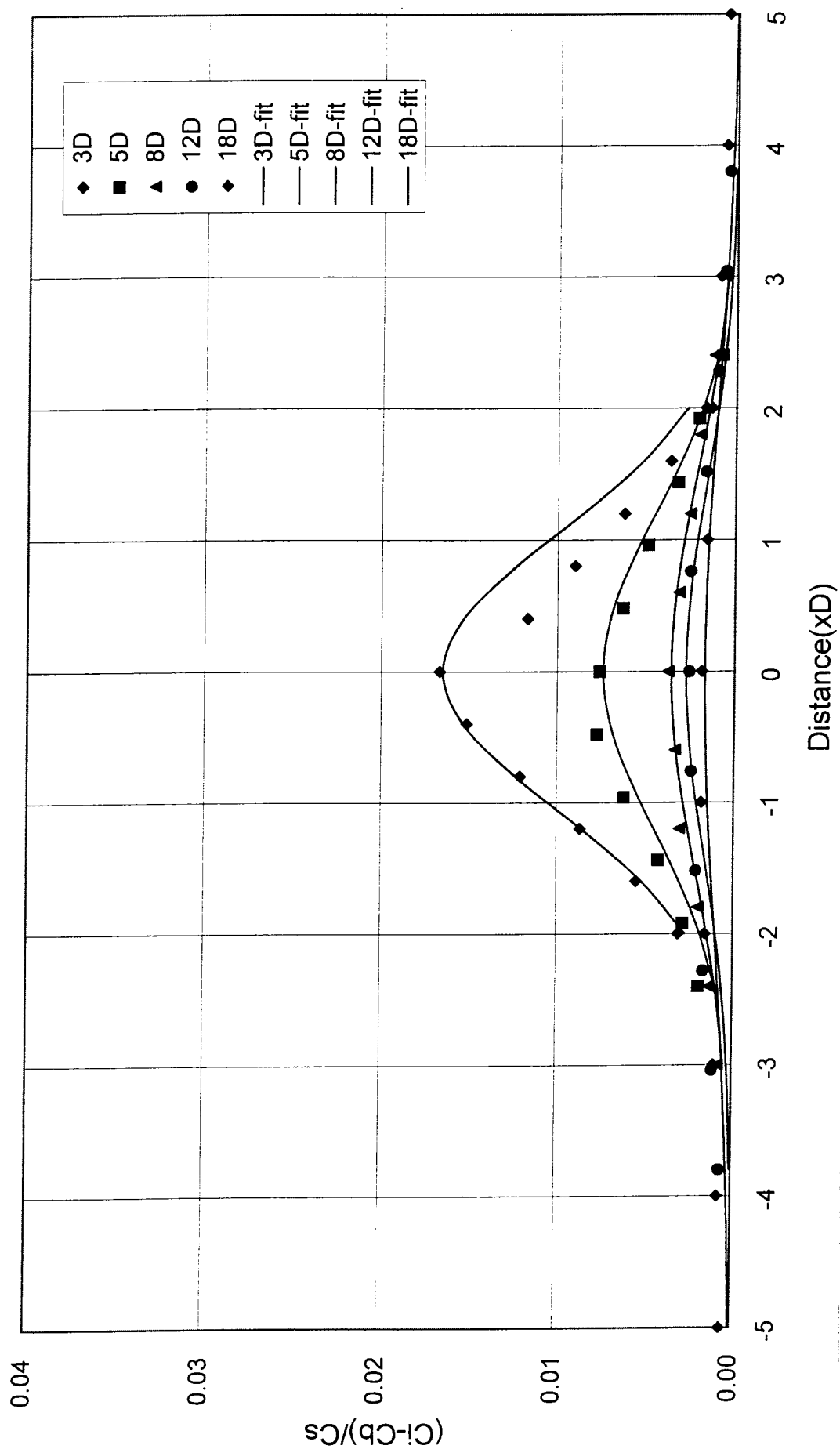


圖 A-45 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/205,  $\rho_s/\rho_a=1.35$ )

# D15B

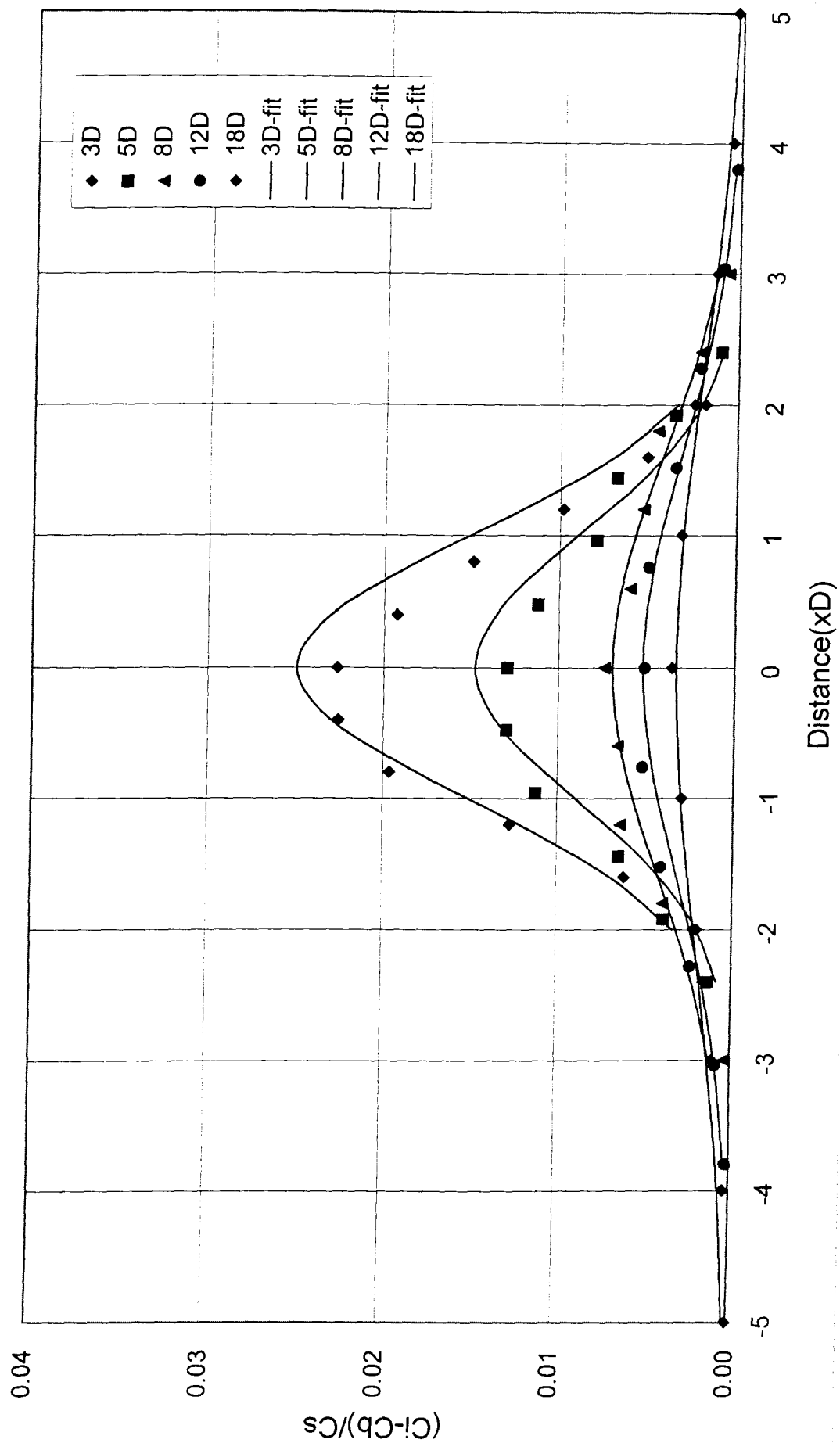


圖 A-46 流經三維方塊模型濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/205,  $\rho_s/\rho_a=1.53$ )

# D15F

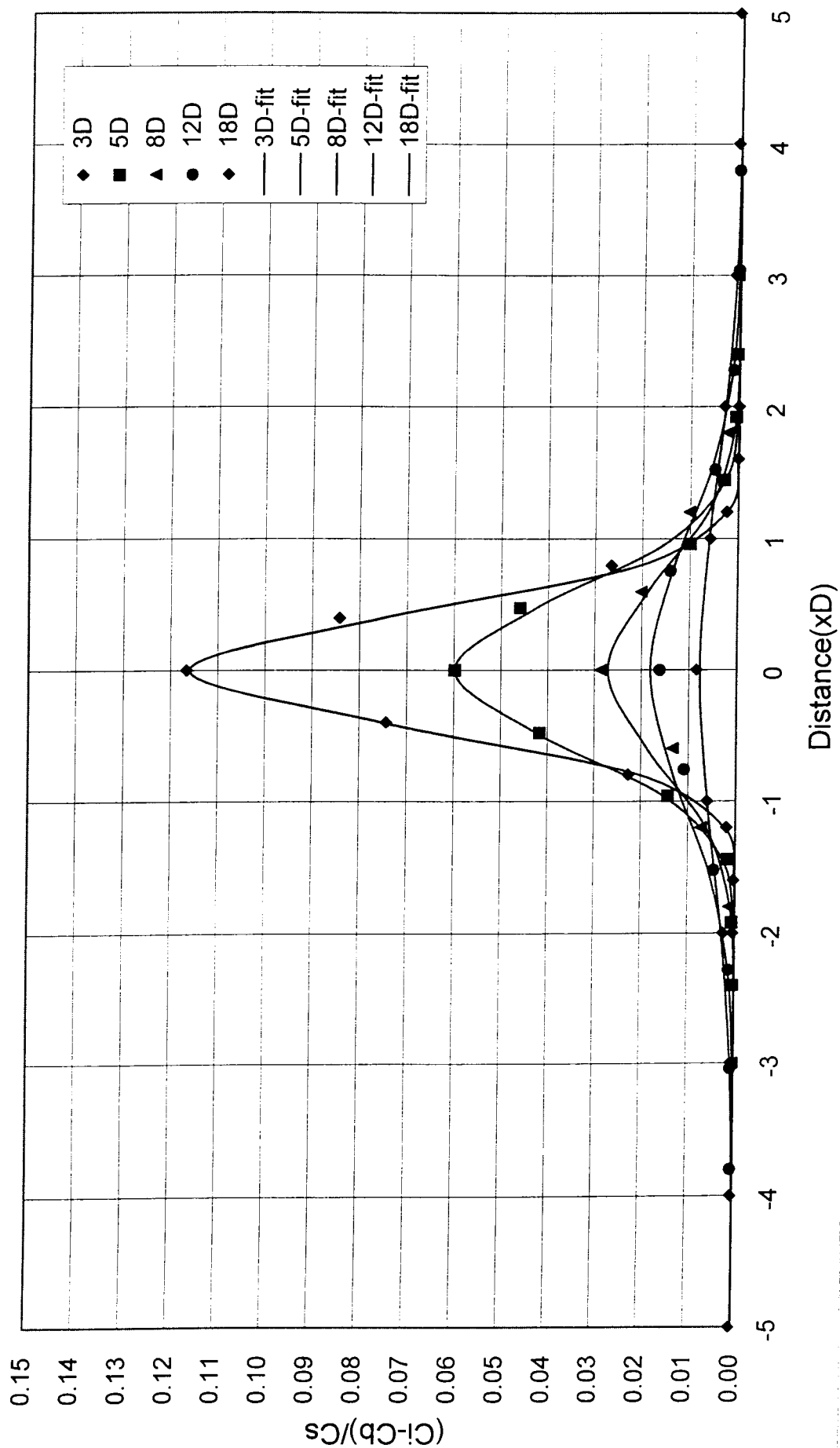


圖 A-47 流經平坦地形濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/205,  $\rho_s/\rho_a=1.53$ )

# D15M

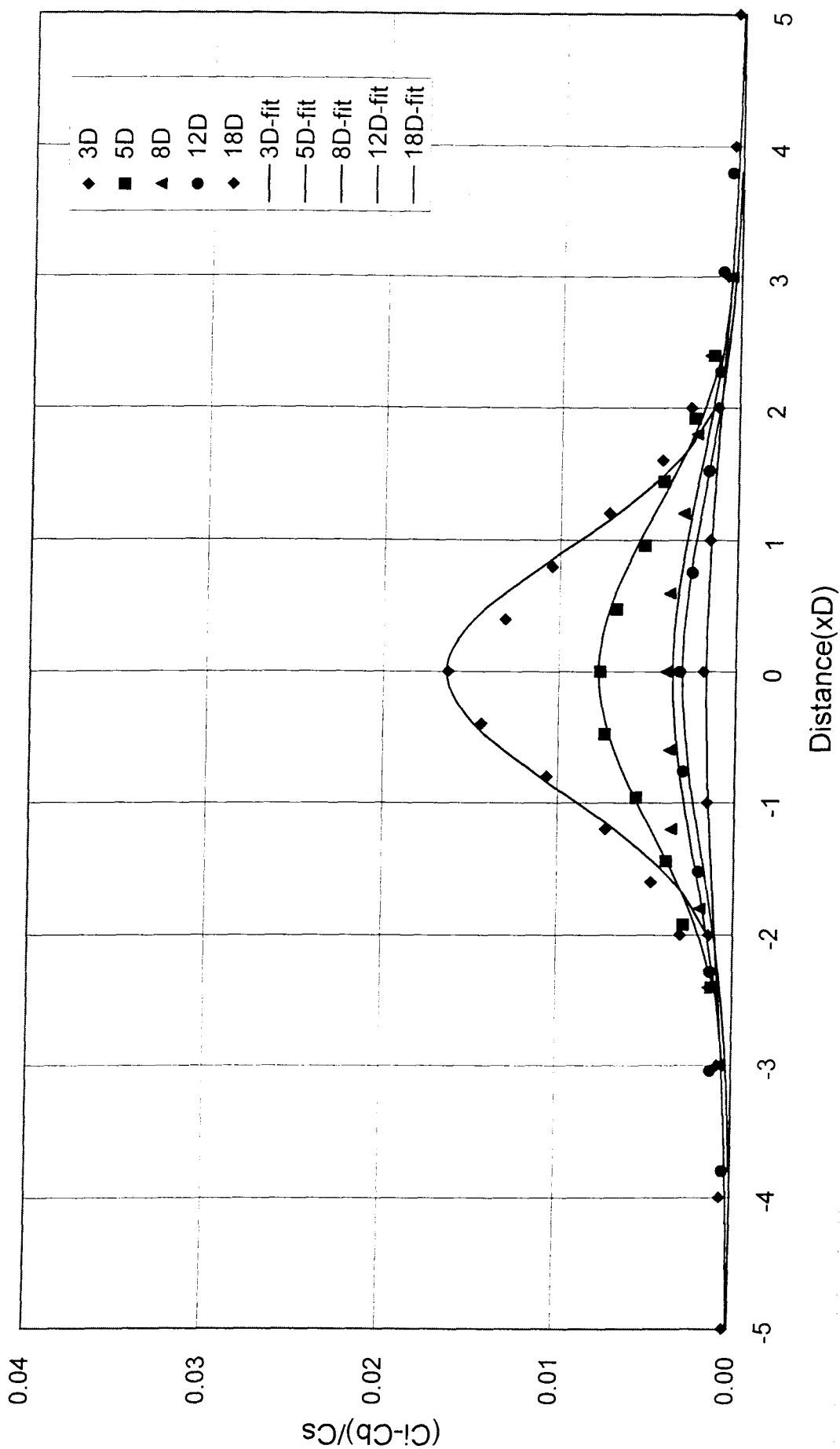


圖 A-48 流經二維山脊模型，濃度係數之側風方向分布剖面(scale=1/205,  $\rho_s/\rho_a=1.53$ )